

SÉRIE A, N° 2135

N° D'ORDRE : 3006

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

Claude FRANCIS-BŒUF

---

1<sup>re</sup> THÈSE. — Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire.

2<sup>e</sup> THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 20 juin 1945, devant la Commission d'examen.

MM. PEREZ, *Président.*

LUTAUD,  
BOURCART, } *Examineurs.*  
DRACH,

---

MASSON & C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, Boulevard Saint-Germain, PARIS (VI<sup>e</sup>)

---

1947

---



SÉRIE A, N° 2135

N° D'ORDRE : 3006

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES  
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES NATURELLES

PAR

**Claude FRANCIS-BŒUF**

---

1<sup>re</sup> THÈSE. — Recherches sur le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire.

2<sup>e</sup> THÈSE. — Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 20 juin 1945, devant la Commission d'examen.

MM. PEREZ, *Président.*

LUTAUD,  
BOURCART, } *Examineurs.*  
DRACH,

---

MASSON & C<sup>ie</sup>, ÉDITEURS  
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE  
120, Boulevard Saint-Germain, PARIS (VI<sup>e</sup>)

---

1947

---

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

*Doyens honoraires*..... M. MOLLIARD et CH. MAURAIN.  
*Doyen* ..... P. MONTEL, Professeur, Théorie des fonctions.

## PROFESSEURS HONORAIRES

L. BRILLOUIN.  
 AUGER.  
 DANGEARD.  
 LESPINEAU.  
 VESSIOT.  
 PORTIER.  
 LAPICQUE.

G. BERTRAND.  
 CH. FABRY.  
 L. BERTRAND.  
 WINTREBERT.  
 DUBOSCQ.  
 BOHN.  
 RABAUD.

CAULLERY.  
 CARTAN.  
 E. BOREL.  
 A. COTTON.  
 J. DRACH.  
 M. GUICHARD.  
 LABROUSTE.

## PROFESSEURS

MM.

CH. PÉREZ ..... T Zoologie.  
 L. BLARINGHEM.... T Botanique.  
 G. JULIA ..... T Analyse supérieure et Algèbre  
 supérieure.  
 C. MAUGUIN ..... T Minéralogie.  
 A. DENJOY ..... T Géométrie supérieure.  
 L. LUTAUD ..... T Géographie physique et Géo-  
 logie dynamique.  
 G. BRUHAT ..... T Physique.  
 E. DARMOIS ..... T Enseignement de Physique.  
 A. DEBIERNE ..... T Physique générale et Radioacti-  
 vité.  
 L. DUNOYER ..... T Chimie-Physique.  
 M. JAVILLIER ..... T Chimie biologique.  
 HENRI VILLAT..... T Mécanique des fluides et appli-  
 cations.  
 CH. JACOB..... T Géologie.  
 P. PASCAL ..... T Chimie générale.  
 M. FRÉCHET..... T Calcul des probabilités et Phy-  
 sique mathématique.  
 E. ESCLANGEON.... T Astronomie.  
 H. BÉGHIN ..... T Mécanique physique et expéri-  
 mentale.  
 FOCH ..... T Mécanique expérimentale des  
 fluides.  
 PAUTHENIER ..... T Electrotechnique générale.  
 DE BROGLIE..... T Théories physiques.  
 CHRÉTIEN ..... T Optique appliquée.  
 PRENANT ..... T Anatomie comparée et Histo-  
 logie.  
 VILLEY ..... Mécanique physique et expéri-  
 mentale.  
 COMBES ..... T Physiologie végétale.  
 GARNIER ..... T Application de l'analyse à la  
 Géométrie.  
 PÉRÈS ..... T Mécanique rationnelle.  
 HACKSPILL ..... T Chimie minérale.  
 TOUSSAINT ..... T Technique aéronautique.

MM.

M. CURIE..... Physique (P. C. B.).  
 G. RIBAUD..... T Hautes températures.  
 CHAZY ..... T Mécanique analytique.  
 GAULT ..... T Chimie (P. C. B.).  
 CROZE ..... T Physique théorique et Physique  
 céleste.  
 DUPONT ..... T Théories chimiques.  
 VALIRON ..... T Calcul différentiel et Calcul  
 intégral.  
 BARRABÉ ..... Géologie appliquée.  
 MILLOT ..... Biologie animale (P. C. B.).  
 F. PERRIN..... Théories physiques.  
 VAVON ..... T Analyse et mesures chimiques.  
 G. DARMOIS..... T Mathématiques générales.  
 CHATTON ..... T Biologie maritime.  
 AUBEL ..... Chimie biologique.  
 JACQUES BOURCART. Géographie physique et Géo-  
 logie dynamique.  
 M<sup>me</sup> JOLIO-CURIE.. Physique générale et Radioac-  
 tivité.  
 PLANTEFOL ..... Biologie végétale (P. C. B.).  
 CABANNES ..... T Recherches physiques.  
 GRASSÉ ..... T Zoologie (Evolution des êtres  
 organisés).  
 PRÉVOST ..... Chimie organique.  
 BOULIGAND ..... Mathématiques.  
 CHAUDRON ..... Chimie (P. C. B.).  
 WYART ..... Minéralogie.  
 TEISSIER ..... Zoologie.  
 MANGENOT ..... Biologie végétale (P. C. B.).  
 P. AUGER ..... Physique.  
 MONNIER ..... Physiologie générale.  
 PIVETEAU ..... Géologie.  
 ROCARD ..... Physique.  
 H. CARTAN..... Calcul différentiel.  
 SCHAEFFER ..... T Physiologie générale.  
 LAFFITTE ..... Chimie (P. C. B.).

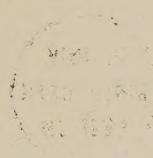
Secrétaire ..... A. PACAUD.

Secrétaire honoraire ..... D. TOMBECK.



A LA MÉMOIRE DE MON PÈRE

A MA MÈRE





DEUXIÈME THÈSE

---

Propositions données par la Faculté :

DÉTERMINISME DES MIGRATIONS  
DE L'ANGUILLE

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 1<sup>er</sup> juillet 1943.

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*

PAUL MONTEL.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Le Recteur de l'Académie de Paris,*

GILBERT GIDEL.



A MA FEMME

A MON FRÈRE

A MES AMIS



## AVANT-PROPOS

*Beaucoup se plaignent, quand il s'agit d'écrire l'avant-propos d'une thèse, de se soumettre à une règle pour le moins fastidieuse. J'avoue que, pour ma part, cela m'est au contraire un devoir des plus agréables. C'est peut-être le seul moment où il est possible de rendre hommage à ceux qui vous ont conduit et vous ont aidé dans la voie scientifique.*

*C'est à M. JACQUES BOURCART, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris, que je dois l'essentiel de la formation scientifique que j'ai pu acquérir. Etant son élève, puis son collaborateur depuis plusieurs années, j'ai successivement pu apprécier sa générosité, son allant, son autorité, son esprit constamment en éveil pour rajeunir la vieille Géologie. Je crois être l'interprète de tous ceux qu'il a groupés, en lui exprimant notre reconnaissance et en lui disant qu'à côté du respect que nous avons pour lui en tant qu'élèves, une profonde amitié et une grande affection nous attachent à lui.*

*Au Laboratoire de Géographie physique, M. LUTAUD, Professeur à la Faculté des Sciences de Paris, m'a témoigné beaucoup de sympathie et je me rappellerai toujours l'atmosphère familiale, empreinte de cordialité et de bonne humeur, que le « Patron » aime et sait maintenir dans son Laboratoire. Qu'il veuille bien accepter, ici, mes remerciements pour les conseils et les critiques qu'il m'a formulées au cours de ce travail.*

*M. R. LEGENDRE, Directeur du Laboratoire maritime de Concarneau (Collège de France), m'a très aimablement reçu dans son Laboratoire et m'a toujours guidé, lors des recherches d'ordre physicochimique, avec toute la compétence qu'il possède en cette matière. De plus, en des moments difficiles, il a bien voulu me prendre comme préparateur à son Laboratoire. Je lui suis infiniment reconnaissant de ses nombreux conseils et de sa bienveillance.*

*J'ai toujours trouvé, là où j'ai été conduit à travailler, des aides et des encouragements. Je voudrais adresser, maintenant, mes remerciements :*

*à l'Institut de Géographie de Paris : MM. E. F. GAUTIER, E. DE MARTONNE, Membre de l'Institut, et CHOLLEY;*

*à l'Institut scientifique chérifien de Rabat : MM. J. DE LÉPINEY, J. MARÇAIS, CH. SAUVAGE, NEMETH et ROUX;*

*à la Station biologique de Roscoff : MM. CH. PÉREZ, Membre de l'Institut, qui a bien voulu me faire l'honneur d'accepter la Présidence de cette thèse; PIERRE DRACH, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de Paris; tous les chercheurs et le personnel de ce Laboratoire et de celui de Zoologie dont je garde le meilleur souvenir;*

*à l'Institut océanographique de Paris : MM. L. FAGE, Membre de l'Institut (1); J. ROUCH, et M. FONTAINE, Professeur au Muséum;*

(1) Je voudrais assurer M. FAGE de ma reconnaissance pour avoir accepté de publier ce travail dans les *Annales de l'Institut Océanographique* (1945).

au *Laboratoire de Géographie physique de la Faculté des Sciences de Paris* : MM. J. GANDILLOT, P. TILLIER (1), G. ZBYSEWSKI et surtout A. REYMOND, à qui je dois d'avoir connu et aimé ce *Laboratoire*; M<sup>lles</sup> V. MALYCHEFF et H. MORDKOVITCH, et, pour ne pas en oublier, l'*Association des Amis et anciens Elèves du Laboratoire*.

M. le Général G. PERRIER, *Membre de l'Institut*, a toujours fait preuve à mon égard d'une grande bienveillance et a obtenu, à différentes reprises, du *Centre national de la Recherche scientifique*, des bourses qui m'ont permis de travailler : qu'il veuille bien croire, ici, à toute ma reconnaissance.

M. PIERRE PRUVOST, *Professeur à la Faculté des Sciences de Lille*, en m'acceptant comme *Collaborateur auxiliaire au Service de la Carte géologique de France*, m'a témoigné une confiance et une amitié que je ne saurais oublier.

Je remercie aussi tous ceux qui m'ont encouragé de leur aide, de leurs conseils ou de leur amitié :

MM. l'Abbé C. GAUDEFROY, *Professeur à l'Institut catholique*; HERUBEL, *Directeur d'Etudes à l'Ecole pratique des Hautes Etudes, Membre de l'Académie de Marine*; L. PÉLISSIER, *Ingénieur hydrographe en Chef de la Marine*; PIERRE URBAIN, *Chef de Service à l'Institut d'Hydrologie et de Climatologie*; E. WOLLMANN (1), *Chef de Service à l'Institut Pasteur*; J. WYART, *Professeur à la Faculté des Sciences de Paris*; A. CAILLEUX, ENZO DE CHÉTELAT, *Géologue errant*, JEAN-CLAUDE VLÈS (1), ELIE WOLLMANN.

C'est pour moi, maintenant, une grande joie que d'évoquer la fraternelle atmosphère et la franchise totale dans laquelle j'ai toujours travaillé au *Laboratoire* et sur le « terrain », grâce à tous ceux qui constituent l'équipe groupée autour de M. J. BOURCART : BORIS BRAJNIKOV, CLAUDE LALOU, ERIC PELLERIN, PIERRE PERREAU, BOGDAN RAJČEVIĆ, CHRISTIAN ROEHRICH, VSEVOLOD ROMANOVSKY.

J'ai très généralement rencontré une grande complaisance dans les différents *Service maritimes des Ponts et Chaussées*, avec lesquels j'ai été conduit à collaborer.

Je remercie, enfin, le *Centre national de la Recherche scientifique*, pour son aide matérielle.

Mai 1943.

Des événements indépendants de ma volonté m'ont obligé à soutenir cette thèse deux années après sa rédaction et son dépôt à la Faculté.

Juin 1945.

---

(1) Mort pour la France (1944).

# RECHERCHES SUR LE MILIEU FLUVIO-MARIN ET LES DÉPOTS D'ESTUAIRE

PAR

CLAUDE FRANCIS-BŒUF,

*Chargé de recherches au C. N. R. S.*

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| INTRODUCTION.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 151 |
| PREMIÈRE PARTIE. — LE CADRE NATUREL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| <i>Chapitre Premier.</i> — DÉFINITION DU TERME D'ESTUAIRE.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 156 |
| <i>Chapitre II.</i> — TOPOGRAPHIE DES RIVAGES.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 158 |
| DEUXIÈME PARTIE. — LE MILIEU FLUVIO-MARIN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
| <i>Chapitre Premier.</i> — HYDRODYNAMIQUE.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 162 |
| 1. Pénétration de la marée (p. 163). — 2. Propagation de la marée (p. 164). — 3. Temps de propagation de la marée. Durée du flot et du jusant (p. 169). — 4. Nature et régime des courants (p. 171). — 5. Evacuation du débit fluvial (p. 178). — 6. Tourbillons et turbulence (p. 181).                                                                                                                                                                            |     |
| <i>Chapitre II.</i> — LA TEMPÉRATURE.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 183 |
| 1. Régime des températures en hiver (p. 184). — 2. Régime des températures en été (p. 187). — 3. Températures le long des rives (p. 192). — 4. Remarques générales sur la répartition des températures des eaux d'estuaire (p. 193). — 5. Importance et rôle de la température (p. 194).                                                                                                                                                                            |     |
| <i>Chapitre III.</i> — LA SALINITÉ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 195 |
| 1. Méthodes de mesure ; expression des résultats (p. 195). — 2. Les marées de salinité : A. Régime d'été (p. 197). - B. Régime d'hiver (p. 206). - C. Salinités le long des rives (p. 211). - D. Comparaisons des régimes de salinité aux différentes époques de l'année (p. 213). — 3. Essai d'interprétation des résultats : A. Hiérarchie des facteurs de variations (p. 215). - B. Mécanisme de la pénétration de l'eau de mer : mélange et diffusion (p. 216). |     |
| <i>Chapitre IV.</i> — LE PH.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 221 |
| 1. Estuaire du Bou-Regreg (p. 221). — 2. Estuaire de la Penzé (p. 222). — 3. Estuaire de la Loire (p. 224). — 4. Estuaire de la Tees (p. 224). — 5. Estuaire de la Rance (p. 224). — 6. Eau de mer littorale (p. 224). — 7. Distribution générale du pH dans un estuaire (p. 225).                                                                                                                                                                                  |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Chapitre V. — TENEUR EN OXYGÈNE DISSOUS.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 225 |
| 1. Estuaire de la Penzé (p. 226). — 2. Estuaire de la Loire (p. 227). — 3. Estuaire de la Tess (p. 228). — 4. Estuaire de la Seine (p. 229). — 5. Estuaire de la Rance (p. 230). — 6. Eau de mer littorale (p. 230). — 7. Conclusions relatives à la teneur en oxygène dissous dans les eaux d'estuaire (p. 231).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
| <i>Chapitre VI. — TENEUR EN SUSPENSIONS ET TRANSPARENCE</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 232 |
| 1. Estuaire du Bou-Regreg (p. 233). — 2. Estuaire de l'Aulne (p. 235). — 3. Estuaire de la Penzé (p. 236). — 4. Estuaire de la Loire (p. 237). — 5. Estuaire de la Tees (p. 238). — 6. Estuaire de la Gironde (p. 238). — 7. Observations sur la coloration des eaux littorales (p. 239). — 8. Interprétation générales des résultats (p. 240).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
| <i>Conclusion : TABLEAU D'ENSEMBLE DU MILIEU FLUVIO-MARIN ET DE SES VARIATIONS.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 241 |
| TROISIÈME PARTIE. — LES DÉPÔTS D'ESTUAIRE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
| <i>Chapitre Premier. — INTRODUCTION : SÉDIMENTS MONODISPERSÉS ET POLYDISPERSÉS.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 245 |
| <i>Chapitre II. — LES SÉDIMENTS MONOPHASÉS.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 247 |
| 1. Cailloux : galets et graviers (p. 247). — 2. Sables : A. Bou-Regreg (p. 249). — B. Seine (p. 251). — C. Loire (p. 251). — D. Penzé et Aulne (p. 251). — E. Gironde (p. 252). — F. Remarques générales sur les sables (p. 252). — G. Méthodes et plan d'étude (p. 253). — H. Propriétés physiques des sables (p. 253). — 3. Poudres et phases inférieures (p. 255).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
| <i>Chapitre III. — LA VASE : SÉDIMENT POLYPHASÉ (COMPLEXE)</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 255 |
| 1. Définition du terme (p. 255). — 2. Aspect macroscopique (p. 257). — 3. La vase, système hétérogène : A. Homogénéité d'ensemble apparente, hétérogénéité réelle (p. 260). — B. Le milieu liquide : teneur en eau (p. 260). — C. Le milieu solide : a. Granulométrie (p. 262) ; — b. Minéralogie (p. 266) ; — c. Activité et inertie de la vase (p. 267) ; — d. Nature chimique du liant : 1° La matière organique (p. 268) ; 2° Le fer (p. 274). — 4. Interactions et échanges entre le milieu et le sédiment : A. Recherches de Murray et Irvine (p. 279). — B. La salinité (p. 280). — C. Le pH (p. 284). — D. Consommation d'oxygène par les vases (p. 286). — 5. Les propriétés physiques des vases : A. Cohésion et plasticité (p. 288). — B. Rigidité et thixotropie (p. 289). — C. Compressibilité et élasticité (p. 289). — D. Perméabilité (p. 289). — E. Structure (p. 289). — 6. Biologie et microbiologie des vases : A. Faune et flore macroscopiques (p. 289). — B. Faune et flore microscopiques (p. 291). |     |
| <i>Chapitre IV. — RÉPARTITION ET EXTENSION GÉOGRAPHIQUE ACTUELLE DES SÉDIMENTS FLUVIO-MARINS.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 293 |
| <i>Conclusions relatives aux SÉDIMENTS FLUVIO-MARINS.</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 295 |
| QUATRIÈME PARTIE. — LES MÉCANISMES DE SÉDIMENTATION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
| 1. Les hypothèses explicatives classiques. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 297 |
| A. Finesse des particules et sédimentation par gravité (p. 297). — B. Les électrolytes de l'eau de mer et leur action flocculante (p. 299).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| 2. Mécanismes proposés .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 302 |
| CINQUIÈME PARTIE. — ÉVOLUTION DES SÉDIMENTS FLUVIO-MARINS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
| <i>Chapitre Premier. — ÉVOLUTION DES VASES : Schorre, polder et marais maritimes</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 305 |
| <i>Chapitre II. — LES FACIES D'ESTUAIRE ET LES ÉQUIVALENTS GÉOLOGIQUES</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 309 |
| 1. Existe-t-il un facies d'estuaire ? (p. 309). — 2. Sédiments d'estuaire et sédiments marins (p. 312). — 3. Vase et argile (p. 313). — 4. Les équivalents géologiques de la vase (p. 315).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
| <i>Chapitre III. — ESSAI D'HISTOIRE GÉOLOGIQUE SOMMAIRE DES ESTUAIRES</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 317 |
| RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 324 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 329 |

## INTRODUCTION

Les sédiments et la sédimentation fluvio-marine tiennent, en géologie stratigraphique, une place importante. Il semble, d'ailleurs, que les géologues confondent, sous une même appellation, plusieurs phénomènes aux processus différents : delta, lagune, estuaire,

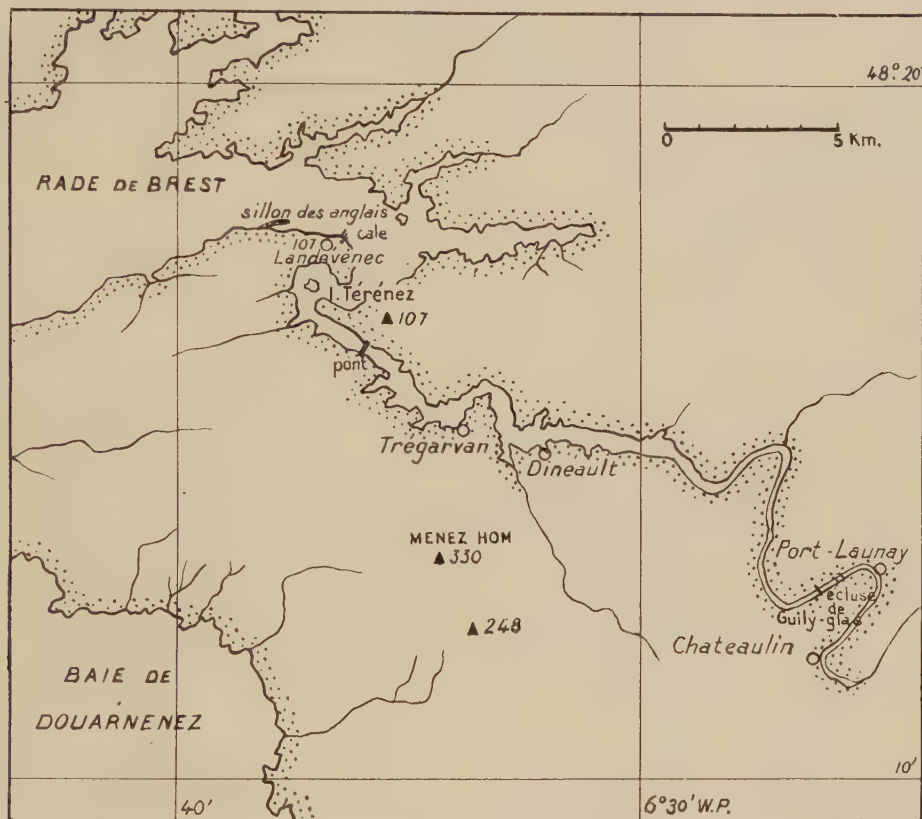


FIG. 1. — L'estuaire de l'Aulne.

représentent, pour eux, des milieux géographiques très voisins, où les phénomènes de sédimentation doivent être, dans l'ensemble, identiques.

Sous la direction de M. JACQUES BOURCART, plusieurs de ses élèves, dont je suis, ont étudié les phénomènes actuels de sédimentation dans les estuaires, se réservant, pour plus tard, la possibilité de les comparer à ceux qui se passent dans les lagunes, les deltas et surtout en mer. C'est le seul procédé qui puisse permettre, un jour, de définir des faciès typiques, s'ils existent.

Si nous nous sommes attaqués, en premier lieu, aux estuaires, c'est qu'à l'heure actuelle, ils sont la terminaison de la plupart des cours d'eau dans les mers et océans à marée. Leur étude est, par ailleurs, facilitée par leur navigabilité très grande : à ce sujet, il suffit de rappeler que les principaux ports du monde sont situés, assez loin en amont,

dans les estuaires. Nous avons donc été conduits à collaborer avec les Services s'occupant de leur aménagement et de la navigation, de jour en jour plus exigeante. Les Services de pilotage (comme celui de la Seine) et les Services maritimes des Ponts et Chaussées (Bordeaux, Nantes, Rouen), en France, effectuent journallement des travaux de sondage et de dragage qui ont été pour nous de la plus grande utilité. De notre côté, nous avons, chaque fois, essayé de préciser quelle était la nature et l'origine des dépôts et par quels processus ils se sédimentaient.

Dans un avenir indéterminé, l'Ingénieur des Ponts et Chaussées et le Géologue (qui,

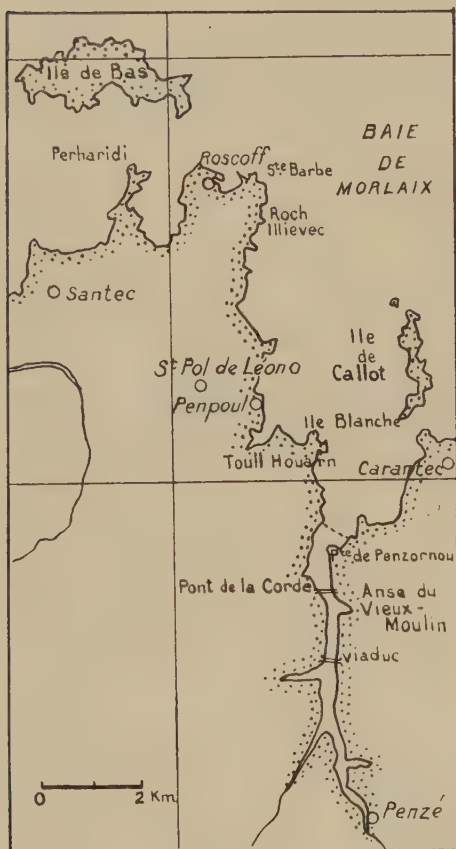


FIG. 2.

FIG. 2. — L'estuaire de la Penzé.

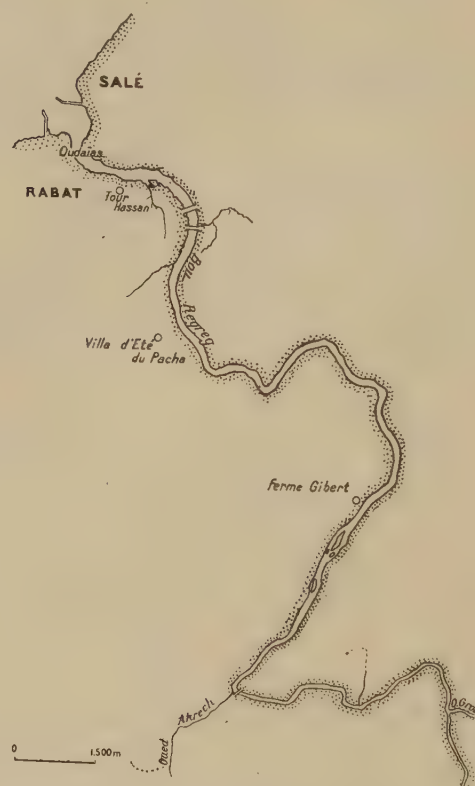


FIG. 3.

FIG. 3. — L'estuaire du Bou-Regreg.

dans ce cas, sera plutôt un géophysicien et un géochimiste), par une étroite et longue collaboration, pourront, peut-être, éviter des dragages inutiles, déterminer des endiguements mieux appropriés et assurer, en somme, aux estuaires français, des chenaux toujours plus profonds, pour une navigation toujours plus intense et des tonnages toujours plus élevés.

La sédimentation, dans les estuaires, a un caractère très particulier, comme j'aurai l'occasion de le montrer, et je pense que, tout au moins en ce qui concerne son méca-

nième, elle mérite, seule, l'appellation de fluvio-marine. Deltas et lagunes ne sont pas à proprement parler des zones où se mélangent les influences fluviales et marines : c'est tantôt l'une, tantôt l'autre qui domine, mais sans périodicité régulière comme dans les estuaires. Cette périodicité tient, essentiellement, à ce que la formation d'un estuaire est un phénomène dû à la prépondérance, à un moment donné, de la mer sur le fleuve,

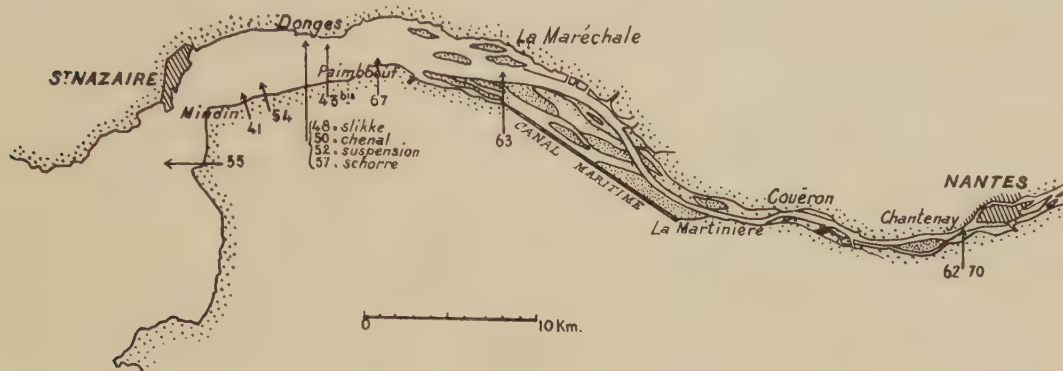


FIG. 4. — L'estuaire de la Loire.

prépondérance qui demeure, dans le temps, et qui se traduit par les marées. C'est le rythme marin auquel il est soumis qui caractérise un estuaire.

On ne serait pas surpris si, étant donné leur importance économique, les estuaires avaient été l'objet d'études très approfondies de la part des géologues et des techniciens. En fait, les premiers ne s'en sont jamais préoccupé avant ces toutes dernières années

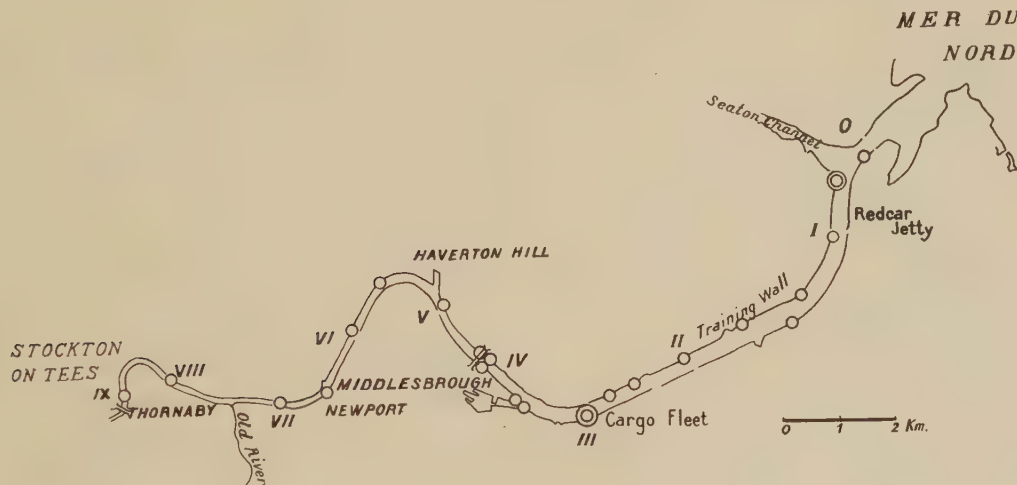


FIG. 5. — L'estuaire de la Tees.

et, quant aux ingénieurs, on ne connaît d'eux, aussi bien en France qu'à l'étranger, qu'un très petit nombre de mémoires. Ces derniers concernant d'ailleurs des calculs théoriques ayant trait bien plus aux déplacements des bancs de sable, et à l'allure à donner aux digues pour améliorer les chenaux, qu'à la recherche des causes naturelles des phénomènes, si intenses et si particuliers, de sédimentation.

C'est surtout la Biologie des estuaires qui a le plus progressé et, du même coup, un certain nombre d'observations et de mesures physico-chimiques ont été enregistrées. Ce ne sont, cependant, que les années 1931-1935 qui ont vu paraître le premier travail complet et très documenté sur ces sujets : je veux parler des importants fascicules de la *Water pollution Research* sur la Tees.

Il ne faut pas oublier les notes ou mémoires, très intéressants, publiés auparavant et concernant la physico-chimie et la Biologie des estuaires; parmi les auteurs français, on pourrait citer entre autres : TH. MONOD (1926), M. PRENANT et M. DUVAL (1926), E. FISCHER-PIETTE (1929), P. CHAUCHARD (1939), etc... La chimie des sédiments, et l'intervention de cycles bactériens dans leur évolution, ont été surtout étudiés par des chercheurs étrangers : B. DOSS (1912), S. WINOGRADSKY (1887-1888) BOYSEN-JENSEN (1914), APSTEIN (1916), S. A. WAKSMAN (1933-1934). Nous nous sommes souvent référé à leurs publications au cours de ce travail.

On trouvera, à la fin de ce mémoire, une assez abondante bibliographie qui semble, *a priori*, contredire mon affirmation quant au manque de données. Si la liste est longue, c'est que j'ai voulu citer un certain nombre de travaux qui ne traitent pas directement du sujet abordé ici, mais qui s'occupent cependant de problèmes faisant l'objet d'études de sciences voisines. Ainsi, la pédologie utilise des techniques d'analyse des sols qui, dans beaucoup de cas, peuvent s'adapter à l'étude des sédiments marins ou fluvio-marins. D'un autre côté, les océanographes physico-chimistes, comme LEGENDRE (1925), LABBÉ (1932), ATKINS (1933), HARVEY (1928) et bien d'autres, ont mis au point des méthodes qu'il a fallu adapter quand il s'est agi d'étudier le milieu fluvio-marin. Des géochimistes, comme PIERRE URBAIN (1937), par ses précieuses études sur les argiles, nous ont permis dans bien des cas de préciser les définitions concernant les dépôts actuels.

Le point de départ de ce travail, comme celui d'ailleurs, de mon ami B. RAJČEVIĆ, sur l'estuaire de la Seine, fut de contrôler une hypothèse très répandue dans les milieux géologiques. Elle consiste à imaginer que les sédiments fins et « argileux » se déposent dans les zones fluvio-marines par suite du rôle flocculateur de l'eau de mer sur les particules jusqu'alors transportées par les eaux douces fluviales. Il nous a donc fallu étudier, très en détail, l'influence de la mer dans les estuaires : c'est ce qui fait, ici, l'objet de la deuxième partie et que j'ai intitulée le milieu fluvio-marin.

RAJČEVIĆ et moi, nous nous aperçûmes bientôt que les modifications physico-chimiques, dues au mélange des eaux douces et marines, n'intervenaient que très peu dans le mécanisme de la sédimentation des vases. J'ai, cependant, continué à exécuter des mesures physicochimiques dans les estuaires, car j'ai pensé que les naturalistes pouvaient être intéressés par un essai de synthèse des résultats obtenus dans ce sens jusqu'à ce jour (1). Pour appuyer mes propres résultats, je n'ai donc pas hésité à faire

(1) La connaissance précise de la physicochimie des eaux fluvio-marines, et de ses variations dans le temps et dans l'espace, peut donner d'utiles indications et aider notamment à résoudre le problème des migrations des poissons euryhalins.

L'étude des migrations de ces poissons, très poussée à ce jour, tient compte, en général, de la profonde modification des eaux littorales aux abords des estuaires. On a souvent fait appel, pour expliquer ces migrations, à des tropismes, où la teneur en oxygène, les courants, la salinité, les températures ou le pH joueraient des rôles plus ou moins importants. Les résultats, exposés ici, sur ces différents facteurs, aideront peut-être, dans une certaine mesure, à expliquer ou à préciser le mécanisme de ces tropismes.

un large emprunt aux publications anglaises sur la Tees : on excusera ainsi ce côté du travail qui n'est pas le résultat de recherches uniquement personnelles.

Quand M. JACQUES BOÛRCART entreprit l'étude des mécanismes actuels de la sédimentation, il confia l'estuaire de la Seine à BOGDAN RAJČEVIČ. Je devais étudier par ailleurs les rivières bretonnes et, en particulier, l'Aulne. Par la suite, j'ai eu l'occasion de pouvoir étendre mes observations à d'autres rivières bretonnes, et surtout à la Penzé, à l'Orne, aux estuaires de la Meseta marocaine (Bou-Regreg, notamment) et à l'estuaire de la Loire. Enfin, des camarades de Laboratoire nous ont apporté, ou fait parvenir, des échantillons qui ont permis des comparaisons : G. ZBYSZEWSKI et O. RIBEIRO, des estuaires du Tage et du Sado (Portugal); E. DE CHÉTELAT, de la côte de Guinée française; C. ROEHRICH, des estuaires vendéens et charentais; A. CAILLEUX, de nombreux points du littoral français et islandais.

B. RAJČEVIČ a terminé une monographie sur l'estuaire de la Seine. Ce travail, du plus grand intérêt, doit lui servir de thèse ; mais l'auteur, retenu par les événements dans son pays, n'a pu la soutenir jusqu'à présent; aussi ne tiendrai-je compte, ici, que des résultats qu'il a déjà publiés.

Il est tout à fait regrettable de n'avoir que des idées très vagues sur les phénomènes qui se passent aux embouchures de fleuves, comme l'Amazone ou le Congo. On peut se demander si ceux qu'on observe dans les estuaires plus modestes, comme la Seine ou la Loire, prennent simplement une plus grande amplitude, quand on sait que, dans l'estuaire de l'Amazone s'engagent, simultanément, jusqu'à 8 ondes de marée, sur une distance de 1.500 kilomètres. Toujours est-il que les conclusions que j'énoncerai ne concerneront pas des estuaires de ce type, car, dans l'ignorance, il vaut mieux s'abstenir d'une telle extrapolation.

On utilise aujourd'hui, en hydrodynamique, des modèles réduits. Il eût été tentant pour nous, d'adopter cette méthode de travail. En dehors des moyens matériels et financiers qu'elle nécessite et qui nous faisaient défaut, elle ne pouvait s'appliquer, du moins au début, à la catégorie de phénomènes que nous voulions étudier. Des modèles réduits d'estuaire ont été réalisés à Grenoble, à Paris, par J. LAURENT (1940), pour l'oued Sebou; en Angleterre, par GIBSON, pour la Severn (1933); en Belgique, en Hollande, etc...

Sans discuter des difficultés qui président au choix du coefficient de similitude, on se serait heurté à une impossibilité d'un autre ordre dans le cas qui nous intéresse. En effet, les variations du milieu physico-chimique sur modèle réduit doivent être sinon impossibles, du moins extrêmement difficiles à suivre. De plus, le débit solide des

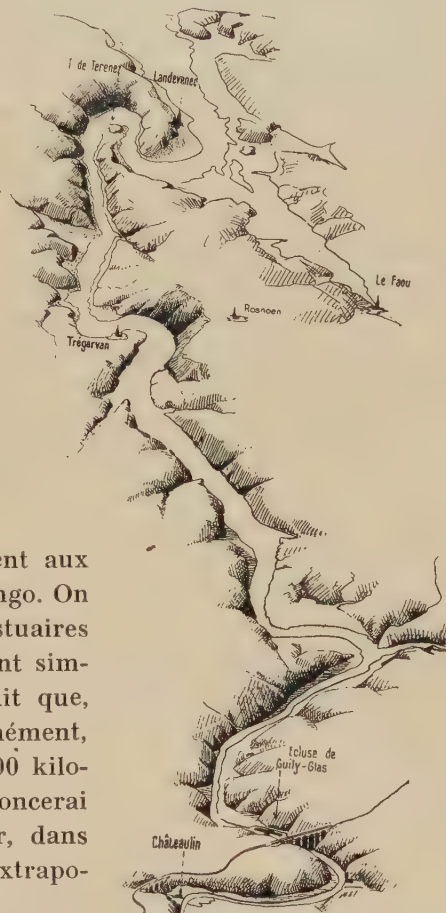


FIG. 6. — Perspective-relief de l'estuaire de l'Aulne.

estuaires, qui est à l'origine des dépôts de vase, est essentiellement polydispersé et de constitution complexe : il était donc impossible de se contenter d'une réduction de la dimension de ses éléments constitutants.

La solution élégante, adoptée par J. LAURENT (1940), sur la proposition de M. BARILLON, dans l'étude de l'estuaire du Sebou, qui consistait à choisir un sable mono-dispersé et très mobile, ne pouvait être retenue.

Toutefois, il va sans dire que l'on possède, dans les modèles réduits, un excellent outil de travail qui doit permettre de résoudre un grand nombre de problèmes d'ordre hydrodynamique, mais sans doute pas physicochimique.

Une assez grande place est réservée, dans ce travail, aux processus biochimiques, qui ont lieu au sein des vases. Il n'y a d'ailleurs là qu'une ébauche de recherches qui intéressent plus particulièrement les biologistes. Des travaux avaient été déjà entrepris dans ce sens par LLYOD et MOORE (1930-31), S. A. WAKSMAN (1933, 1934, 1935) et aussi par J. HJORT (1938), pour les vases marines auxquelles ce dernier auteur attribue une importance particulière comme nourriture de certaines espèces de fond et, entre autres, de la Crevette (*Pandalus borealis*). Par la suite, M<sup>lle</sup> LUX (1938, 1939), sous la direction de M. FAGE, a commencé des investigations sur les vases littorales, ou plus justement sur la pellicule de surface, dans un but analogue. Je n'apporte ici qu'une contribution à cette branche de la Biologie, mais comme elle concerne les estuaires, elle pourra, peut-être, être utile à ceux qui s'occupent de l'écologie de ces zones fluvio-marines.

Sur le « terrain », comme au laboratoire, j'ai utilisé des techniques d'étude des eaux et des sédiments, qui sont classiques. Je n'ai pas jugé utile de les décrire à nouveau dans ce travail, qui en sera d'autant allégé. B. BRAJNIKOV, V. ROMANOVSKY et moi-même (1943), avons, en effet, publiés précédemment un recueil de toutes ces techniques.

Le travail que je présente aujourd'hui, est divisé en cinq parties d'importance inégale. Chacune d'elles ne doit être considérée que comme une suite de jalons posés pour l'étude de la sédimentation et du milieu fluvio-marin. Presque toutes les questions envisagées demandent encore de longues recherches, de nombreuses mesures, de multiples observations et, surtout, une étroite collaboration des chercheurs des différentes disciplines scientifiques.

## Première Partie. — LE CADRE NATUREL

### CHAPITRE PREMIER. — DÉFINITION DU TERME D'ESTUAIRE.

Le terme d'estuaire vient, étymologiquement, du latin *æstuarium*. La racine même *æstus* signifie que la marée joue un rôle important dans les estuaires; pour moi, comme on le verra, elle joue le rôle essentiel. Elle y détermine, en effet, un régime hydrodynamique très particulier, qui conditionne le mécanisme de sédimentation et par conséquent l'allure morphologique des dépôts. A l'échelle d'observation du géographe, il existe un faciès d'estuaire typique que l'on reconnaît tout le long du littoral de la Manche et de l'Atlantique. Qu'il s'agisse des petits estuaires bretons ou des estuaires de plus larges proportions, comme la Seine, la Loire ou la Gironde, partout se retrouvent les phéno-

mènes de marée se propageant dans la vallée vers l'amont, sur une distance plus ou moins grande; partout il existe des dépôts de vase (1) apparaissant à marée basse (slikke) sur les bords, sous forme de bancs noirâtres, si les conditions naturelles ne sont pas trop modifiées par l'homme.

L'estuaire est, pour le sens commun, la terminaison d'un cours d'eau par un seul bras, ayant plus ou moins une forme d'entonnoir. A cette notion s'oppose habituellement celle de delta. On a également l'habitude de penser que les estuaires n'existent que dans les mers à marées et que les deltas sont la prérogative des mers sans marée, du type de la Méditerranée. Très généralement, ces oppositions se justifient et il est facile, en examinant une carte à grande échelle, de constater que presque tous les fleuves du littoral atlantique, pour ne pas dire la totalité, se terminent par un seul bras,

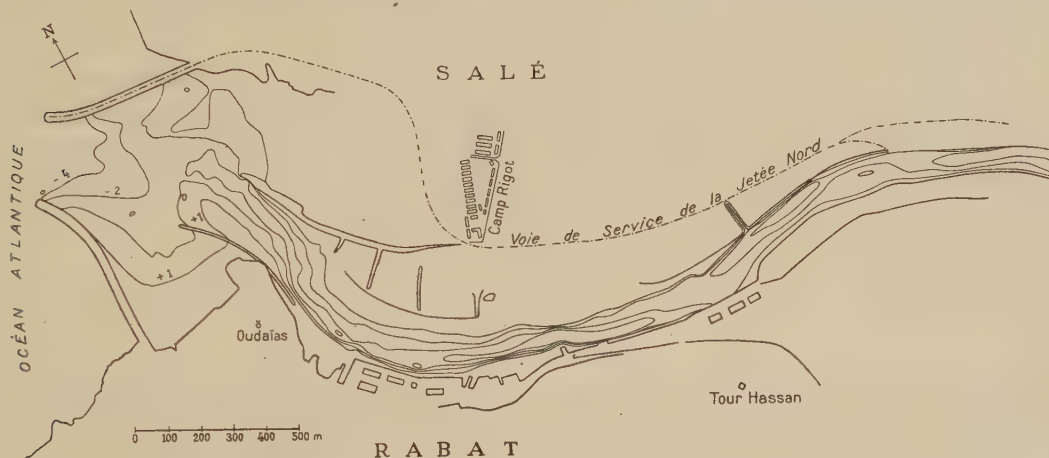


FIG. 7. — Courbes bathymétriques à l'embouchure de l'estuaire du Bou-Regreg.

alors que la plupart des fleuves méditerranéens finissent dans la mer par des deltas, tels ceux du Rhône et du Nil.

Du point de vue morphologique, le delta est un cône de déjection qui résulte de l'amortissement du courant fluvial au contact de la mer. Ainsi, les matériaux transportés par le fleuve avec une certaine vitesse, se sédimentent brusquement, par suite de la réduction (ou même de l'annulation) du courant à l'arrivée en mer. D'autre part, la forme, en cône, des deltas est due à l'écartement des lignes de flux. On comprend facilement que, dans une mer sans marée, les sédiments, ainsi déposés à l'embouchure, ne soient ni enlevés ni balayés par des courants périodiques marins, qui n'existent pas.

Je réserve le terme d'estuaire pour le cours inférieur de fleuves remontés sur une certaine distance par le flot périodique de la marée.

La définition du terme d'estuaire, qui vient d'être donnée, convient à une très grande variété de terminaisons fluviales. Si tous les estuaires sont remontés par la marée, ils n'en gardent pas moins leur caractère morphologique particulier qui résulte essentiel-

(1) Ce terme sera défini dans un chapitre ultérieur. Au cours des pages qui suivent, il pourra sembler que, vase et argile, sont employées indistinctement. Géologues et géographes confondent souvent les deux termes ou définissent le premier par le second. Aucun rapport n'existe cependant entre argile et vase, et, dans les estuaires, il ne se dépose que de la vase.

lement du stade d'évolution auquel il se trouvait lors de l'ingression de la mer. Ce stade dépend lui-même de l'histoire géologique régionale pour l'estuaire considéré. Il n'existe donc pas un type général d'estuaire, mais un très grand nombre de variétés.

Ce que, par contre, il est important de ne pas oublier, c'est que, quelque soit leur forme, les estuaires sont remontés par la marée parce que la pente du lit est toujours très faible.

La situation du point le plus en amont du bas cours d'un fleuve, atteint par la marée, dépend avant tout de cette pente. Pour des pentes égales, elle dépend du débit fluvial (facteur dominant), de l'amplitude moyenne de la marée (donc de la situation géographique de l'estuaire), du coefficient de marée et, secondairement, du vent. Le point le plus éloigné en amont où se fait sentir la marée est donc sujet à des variations de périodes différentes : saisonnières (débit fluvial), quotidiennes (coefficient de marée), horaires (vent).

Si la pente moyenne est toujours très faible, cela ne veut pas dire qu'elle soit régulière. Des accidents dans la pente sont nombreux, surtout dans les estuaires aménagés pour la navigation, où une succession continue de dragages entretient un chenal dont la pente moyenne est presque nulle, mais où les fosses et les seuils sont cependant fréquents (voir fig. 7).

## CHAPITRE II. — TOPOGRAPHIE DES RIVAGES

Quels que soient l'estuaire et son histoire géologique, la topographie des rivages ne varie guère.

Pour un fleuve, on a l'habitude de délimiter un lit mineur ou lit d'étiage et un lit

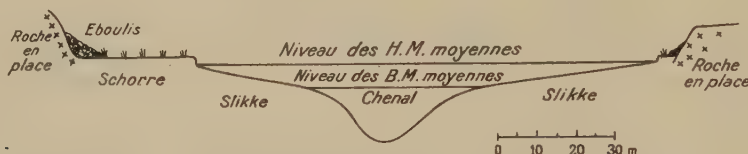


FIG. 8. — Coupe transversale schématique d'un estuaire.

majeur ou lit de crues (inondations). Dans un estuaire, les phénomènes de marée, prenant, de beaucoup, le pas sur les variations de débit fluvial, les notions de lit majeur et de lit mineur n'ont pas la même importance. Il y a, en effet, deux fois par 24 heures, des basses eaux, et deux fois des hautes eaux. Le lit est donc deux fois majeur et deux fois mineur en 24 heures. Mais il est bien évident que le plus haut niveau que l'eau peut atteindre est fonction, non plus seulement du débit fluvial, mais encore du coefficient de marée. C'est donc par des coefficients de marée élevés et de forts débits fluviaux que le lit majeur devra être défini. Le plus bas niveau atteint par l'eau dépend aussi du coefficient de marée et du débit fluvial. Mais c'est par débit fluvial minimum et coefficient de marée maximum, que le lit mineur devra être défini. C'est en effet par fort coefficient de marée que la mer monte le plus haut et qu'elle baisse le plus bas. Encore faudrait-il tenir compte, dans une certaine mesure, du vent.

Ces remarques préliminaires faites, sous quels aspects se présentent les rives d'un estuaire ?

La coupe transversale schématique donnée ici (fig. 8) est très générale : 1. *Roche en place* (ou, quand elles existent, les terrasses quaternaires). — 2. *Schorre et polder* (terrasse récente). — 3. *Dépôts actuels* (slikke).

1. **ROCHE EN PLACE.** — On confondra, ici, la roche en place et les terrasses qui peuvent exister (en Loire, par exemple), car, au même titre, elles constituent aujourd'hui les versants propres de la vallée de l'estuaire. Ces versants sont donc assez différents par leur forme suivant la nature lithologique de la roche qui les constitue. Très généralement, ils ne sont pas atteints par le lit majeur, mais comme cela arrive cependant quelquefois il est bon de les noter dans la coupe.

Tantôt, donc, la roche du versant est meuble (limons, head des rivières de Penzé et de Morlaix), tantôt, consolidée (grès dévoniens et siluriens de l'estuaire de l'Aulne ; craie de l'estuaire de la Seine ; marnes, grès, calcaires, de l'estuaire du Bou-Regreg).

Il arrive, et c'est le cas assez fréquemment dans l'estuaire de l'Aulne, dans la section comprise entre Trégarvan et Landévenec, que la structure géologique locale fasse que l'eau borde directement la roche (vallée épigénique très encaissée) à haute mer de vive eau : exemple du Saut-du-Loup de la rive concave du méandre de Trégarvan, ou de la rive concave du méandre de Térenez, plus en aval. C'est encore le cas, par exemple, au niveau de la Halte de Robinson, dans l'estuaire du Bou-Regreg ; l'embouchure de l'estuaire du Tage est aussi un bon exemple de cette épigénie.

Mais, la plupart du temps, le versant est bordé par une terrasse qui constitue la vraie rive de l'estuaire. Elle n'est pas toujours recouverte par les eaux, même les plus hautes, et dans ce cas elle a l'aspect d'une prairie récemment conquise au domaine fluvio-marin. Il faut dire d'ailleurs que cet isolement est essentiellement dû aux travaux d'aménagement de l'homme. En effet, les digues protectrices isolent entièrement de l'estuaire de vastes surfaces : rien n'est plus remarquable, à ce propos, que les prairies qui bordent, à l'heure actuelle, les estuaires de la Seine (entre Tancarville et le Havre, sur la rive droite) ou de la Loire (au niveau de Donges, par exemple).

2. **SCHORRE.** — Mais quand l'homme n'intervient pas, ces prairies se confondent la plupart du temps avec ce que l'on nomme le schorre. Ce terme, comme celui de slikke qui va suivre, est d'origine flamande. Ils ont été généralisés par les géographes et les biologistes depuis l'important travail de J. MASSART (1908) sur les districts alluviaux et littoraux de la Belgique.

Suivant les estuaires, suivant les sections d'un même estuaire, la position du schorre change par rapport au niveau des plus hautes eaux. En été, dans les estuaires des rivières atlantiques, il arrive que, par marées de vives eaux exceptionnelles, il soit submergé à haute mer. Il arrive aussi qu'il ne le soit pas (cas du Bou-Regreg, en amont du viaduc du chemin de fer). Toujours est-il qu'il se présente comme une étendue où pousse une végétation généralement halophile. Cette étendue réalise, somme toute, une terrasse au-dessus des dépôts découvrant à marée basse. La pente transversale de cette terrasse est très faible, sinon nulle. Longitudinalement, elle s'abaisse de l'amont vers l'aval ; mais son altitude relative par rapport aux sédiments de la slikke n'est pas constante, même

pour un même estuaire. Ainsi la pente longitudinale du schorre du Bou-Regreg est plus grande que celle des dépôts de la slikke; à un tel point que si, en amont du viaduc, le schorre est une terrasse incontestable et très individualisée, aux environs de la Tour Hassan, sa limite de séparation avec la slikke n'est pas nette : l'un continue l'autre. Le schorre a une superficie variable suivant la forme de la vallée dont il occupe fond. Dans les vallées encaissées et étroites (la plupart des vallées bretonnes), il est peu développé (quelques mètres); mais par exemple, dans celle du Bou-Regreg, qui est encaissée mais large, le schorre prend une très grande extension et il constitue ce que localement on appelle les *ouldjas*. Le cours actuel de l'estuaire décrit des méandres divagant à travers ces *ouldjas*.

Il arrive donc que le schorre soit exceptionnellement recouvert par les eaux qui peuvent alors atteindre les versants de la vallée, ou le plus souvent les éboulis (petite plaine de piemont). Mais le plus fréquemment — et ce fait s'inscrit dans la topographie même — par des marées de mortes eaux, des marées moyennes et même souvent des marées de vives eaux, le schorre constitue les rives bordées par l'eau à haute mer. La plupart du temps, il se termine au-dessus de la slikke par un talus allant de quelques décimètres à deux ou trois mètres (schorre du Bou-Regreg en amont de la villa d'été du Pacha). Ce talus peut donc être considéré comme une micro-falaise.

Il arrive, cependant, qu'il n'existe pas de talus et que, par conséquent, la rive soit topographiquement moins bien déterminée. C'est le cas lorsqu'au lieu de végétation halophile, il y a envahissement par les roseaux (*Phragmites*). Ce paysage est fréquent dans les zones situées les plus en amont de l'estuaire (confluence de la Doufine et de l'Aulne, Gironde en amont de Bordeaux). Dans ces conditions, la rive est, à haute mer, très indécise.

Le schorre est très souvent découpé par des vallées affluentes de l'estuaire et que l'on appelle des « marigots ». La plupart du temps, ils sont presque à sec, à mer basse, mais ils sont envahis par l'eau à haute mer.

3. LA SLIKKE. — Dans un estuaire, à mesure que la mer baisse, elle découvre des bancs de vases noirâtres ou brunâtres, qui sont donc à vrai dire les rives de l'estuaire. Ces bancs découvrants forment la slikke. Leur développement, leur pente, dépend de leur situation géographique. Si l'estuaire décrit des méandres, la rive convexe est alors constituée par un banc très développé, à pente transversale très douce. Comme exemple typique, il suffira de citer la grande vasière de Landévenec, ou celle de l'île de Térénez, dans l'estuaire de l'Aulne. La rive concave, au contraire, possède une slikke peu développée et à pente très raide (rive concave en face de l'île Térénez). Quand l'estuaire a un parcours rectiligne, le développement de la slikke est sensiblement égal des deux côtés.

La plupart du temps, le lit mineur (basse mer) est sensiblement parallèle au lit majeur (haute mer), mais il arrive, notamment dans les estuaires bretons non entretenus pour la navigation, que le lit mineur décrive des méandres qui n'étaient pas soupçonnables à haute mer. L'eau, à basse mer, circule alors entre des méandres de slikke. Le très grand développement de ces bancs est remarquable (Penzé, Aulne, Odet, rivière de Concarneau, etc., etc...) et se trouve être la cause fréquente d'enlissement des bateaux.

Certains estuaires, comme celui de la Loire (fig. 9), possèdent un chenal qui n'est

pas unique; il se dédouble, en effet, à partir de Donges. Les deux bras sont séparés par des bancs de sable qui découvrent à marée basse. L'importance de ce dédoublement est grande, car les courants de flot et de jusant commencent à se faire sentir dans l'un des bras avant l'autre. Les Ponts et Chaussées ont eu à choisir entre ces deux chenaux : celui du Sud qui, jusqu'à ces dernières années, était entretenu et utilisé par la navigation, est aujourd'hui abandonné au profit du chenal Nord que les conditions hydrodynamiques locales faisaient préférer. Ce changement, qui a coûté de gros efforts de dragages, est une belle réalisation technique qui a été couronnée de succès : en effet, à l'heure actuelle, le chenal Nord semble pouvoir s'entretenir facilement de lui-même par suite de la

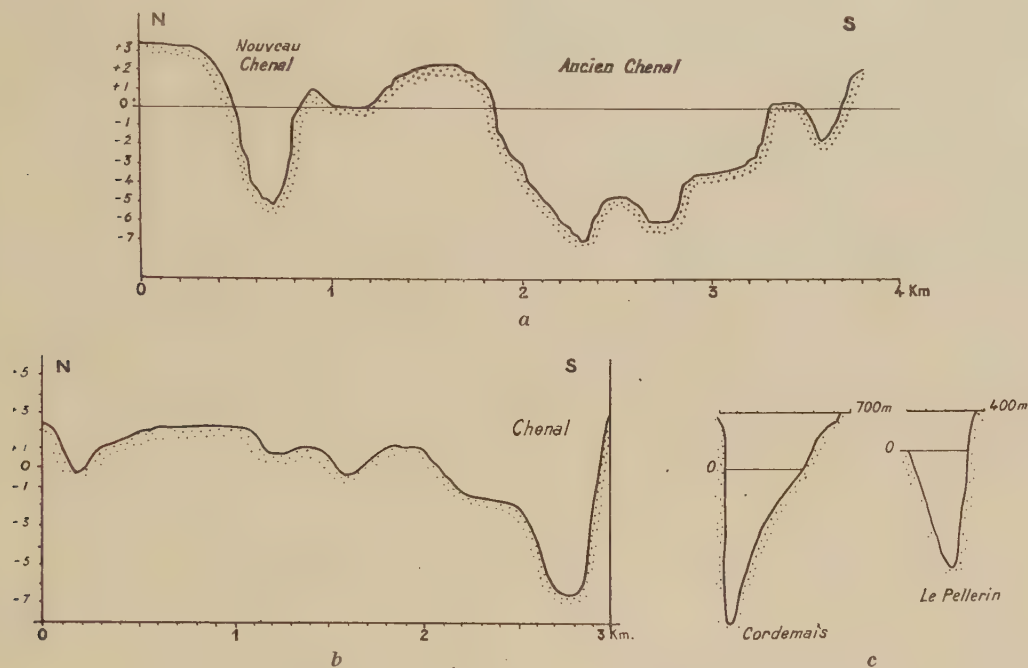


FIG. 9. — Coupes transversales successives dans l'estuaire de la Loire.

- a. Entre Saint-Nazaire et Donges.
- b. Au niveau de Paimbœuf.
- c. Au Cordemais et au Pellerin.

canalisation des courants de marée, tandis que le chenal Sud, abandonné, se comble petit à petit et permet ainsi l'emmagasinement d'un plus grand volume d'eau dans le chenal Nord.

Dans le Bou-Regreg, à 14 km. en amont de l'embouchure, existent des îles, constituées de vases du type de la slikke, mais où la végétation a fait souche dans la haute partie (en périodes de crues ou de vives eaux, ces îles sont toutefois submergées). A leur niveau, l'estuaire se divise en deux bras. Il n'existe pas de sondage qui permette de dire, à coup sûr, comment se sont formées ces îles, ni sur quel substratum elles reposent. A l'origine devait exister un pointement rocheux qui s'est envasé plus intensément que le reste du lit de l'estuaire. Les vases continuent à se déposer à l'heure actuelle sur les bords.

L'amplitude de la marée décroît normalement, de l'aval vers l'amont d'un estuaire, pour s'annuler finalement : *grosso-modo*, la slikke suit cette règle. C'est peut-être dans l'estuaire du Bou-Regreg, dont aucun ouvrage artificiel ne vient empêcher la propagation du flot, que la disparition progressive de la slikke est la plus nette. Dans les estuaires plus ou moins transformés par l'homme (endiguements, murs de quais, barrages ou écluses), la slikke disparaît très souvent brusquement, car le niveau de l'eau oscille verticalement le long de ces parois artificielles, la profondeur étant toujours maintenue très grande.

La slikke est modelée par le va-et-vient continu de l'eau. Sa physionomie est loin d'être uniforme. Dans la plupart des cas, la slikke constitue un banc à pente douce et régulière qui s'abaisse du talus du schorre au chenal. Mais il arrive (ce phénomène est particulièrement net dans l'estuaire de Morlaix), que la slikke, après un parcours en pente douce, atteigne le chenal par un talus très raide. Le ravinement de ce talus est tel que l'on se croirait en présence de lapiez. Cette différence dans le modelé, pour des vases de même constitution apparente, peut, à mon sens, s'expliquer de deux façons différentes :

1° Par les seules lois de l'écoulement des eaux pendant le jusant qui, suivant la pente du substratum, ruissellent en nappe tout d'abord, puis, par suite de l'accentuation de la pente, se concentrent et déterminent la formation de sillons de plus en plus marqués ;

2° Par l'évacuation des eaux qui filtrent, d'ailleurs dans une très faible mesure seulement, de la zone supérieure, et qui sourdent aux différents niveaux du talus, déterminant des cirques qui se transforment peu à peu en sillons et qui, finalement, par érosion régressive, amorcent des vallées secondaires affluentes.

## Deuxième Partie. — LE MILIEU FLUVIO-MARIN

### CHAPITRE PREMIER. — HYDRODYNAMIQUE

Il y a longtemps que les estuaires ont attiré l'attention des ingénieurs par leur jeu compliqué de courants qui, à la fois, favorisent et gênent la navigation.

C'est sans doute BOUNICEAU (1845) qui fut le premier à publier un volume entier consacré à la navigation dans les rivières à marées ; il fut suivi par BEECHY (1849) qui étudia les phénomènes de marée dans l'estuaire de la Severn, par WHEELER (1868, 1893, 1906), par BELLEVILLE (1889), par PARTIOT (1861, 1892) qui tous ont publié d'importants travaux sur le régime des courants fluvio-marins.

Le mascaret, phénomène de marée d'un type exceptionnel, et particulièrement net dans l'estuaire de la Seine, a donné lieu à d'innombrables publications qui se contredisent plus ou moins.

Un travail classique parmi les ingénieurs, le livre de G. de JOLY (1923), sur la mer et les côtes, consacre également de nombreuses pages à ce sujet.

Il ne s'agit pas ici d'analyser tous ces livres ou mémoires ; aussi vais-je m'en tenir à exposer brièvement les lois essentielles de l'hydrodynamique dans les estuaires, en insistant sur les points qui intéressent plus particulièrement le géographe ou le naturaliste.

## 1. — La pénétration de la marée.

Comme on vient de le voir au chapitre précédent, un estuaire est la terminaison d'un fleuve dans lequel, pour des raisons d'ordre géologique, la marée se fait aujourd'hui sentir. Comme, d'autre part, les estuaires, tels qu'ils ont été définis, n'existent que dans les mers à marée, il est normal que les courants de marée y soient particulièrement sensibles. La forme en entonnoir de bon nombre d'estuaires rappelle les baies échan-crées où l'onde de marée prend une amplitude particulièrement grande. Très générale-ment, il n'y a, dans un estuaire, qu'une seule onde de marée à la fois. En effet, la dis-tance que le flot peut remonter vers l'amont est, dans la plupart des cas, limitée à quelques dizaines de kilomètres, une centaine pour les grands estuaires. Dans ces con-ditions, l'onde a le temps de parcourir toute cette distance avant qu'une nouvelle onde n'atteigne l'embouchure.

Dans le cas des très grands estuaires du type de celui de l'Amazone ou même du Saint-Laurent, la distance que la marée peut remonter est considérable : elle atteint en effet 500 km. pour le Saint-Laurent et 1.500 km. pour l'Amazone. L'estuaire du Saint-Laurent verrait parfois plusieurs ondes de marée engagées; mais, d'après HERSHELL, les phénomènes seraient encore plus complexes pour l'Amazone qui contiendrait, paraît-il, jusqu'à 8 ondes engagées simultanément dans son cours.

Mais les estuaires du littoral nord-atlantique oriental sont de moindres proportions et les phénomènes de la marée y sont plus simples à étudier.

Je reproduis ici les distances maxima (à partir de l'embouchure) auxquelles se fait encore sentir la marée (distances qui sont données dans le livre de G. DE JOLY [1923]). J'y ai ajouté la même caractéristique pour les estuaires moins importants que j'ai étudiés, dont on parlera souvent au cours de ce travail.

|                  |         |        |                                |                                                                              |
|------------------|---------|--------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Adour .....      | jusqu'à | 66 km. | de l'embouchure (pont de Dax). |                                                                              |
| Garonne .....    | »       | 157 »  | »                              |                                                                              |
| Dordogne .....   | »       | 161 »  | »                              |                                                                              |
| Charente .....   | »       | 95 »   | »                              |                                                                              |
| Seine .....      | »       | 144 »  | »                              | (quand le barrage de Martot est abattu,<br>ce qui maintenant est définitif). |
| Escaut .....     | »       | 168 »  | »                              |                                                                              |
| Elbe .....       | »       | 132 »  | »                              |                                                                              |
| Tamise .....     | »       | 108 »  | »                              |                                                                              |
| Tees .....       | »       | 40 »   | »                              |                                                                              |
| Severn .....     | »       | 60 »   | »                              |                                                                              |
| Mersey .....     | »       | 70 »   | »                              |                                                                              |
| Loire .....      | »       | 70 »   | »                              |                                                                              |
| Aulne .....      | »       | 30 »   | »                              |                                                                              |
| Elorn .....      | »       | 25 »   | »                              |                                                                              |
| Bou-Regreg ..... | »       | 20 »   | »                              |                                                                              |
| Penzé .....      | »       | 15 »   | »                              | (depuis la pointe de Carantec),<br>30 km. à partir de Roscoff.               |

Comme on le voit, ce sont essentiellement de petits estuaires que j'ai étudiés. Je ferai remarquer à ce propos que presque tous les estuaires bretons sont du même ordre de grandeur, — généralement entre 15 et 30 km. Ils ont la particularité d'avoir, presque tous, une limite artificielle qui fait obstacle à la propagation de la marée vers l'amont. Cette limite est habituellement un petit barrage qui sert à un moulin; quelquefois aussi, ce sont des écluses qui permettent de conserver un certain niveau durant la basse mer :

c'est le cas pour l'Aulne (écluse de Guily-Glas), pour la rivière de Morlaix, pour la Rance (écluse du Chatelier), etc...

Les distances de pénétration de la marée pour les fleuves précédents se répartissent donc en deux groupes : 1° ceux qui sont remontés par l'onde de flot jusqu'aux environs de 100 km. vers l'amont; 2° ceux où le flot ne se fait sentir que sur une trentaine de kilomètres. La raison essentielle doit être recherchée dans la pente du lit de l'estuaire. Comme nous l'avons vu, elle est très faible pour tous; mais, dans le cas des rias de la côte bretonne ou du Bou-Regreg, ce sont des vallées rajeunies qui ont été submergées, et ce n'est que dans leur cours tout à fait inférieur que la mer peut pénétrer. En amont de la limite de la pénétration du flot, la pente du lit est relativement forte et, dans certains cas même, elle peut prendre l'allure de celle d'un torrent. Il est donc évident que ce n'est pas le seul débit fluvial qui conditionne la plus ou moins grande pénétration de la marée; en effet, des fleuves comme la Loire, la Seine, la Gironde, dont le débit considérable, sont remontées par le flot sur une distance quatre à cinq fois supérieure à celle des estuaires bretons.

La forme d'un bon nombre d'estuaires rappelle celle de l'entonnoir et c'est la meilleure pour une progression régulière et maximum de l'onde de marée. La Loire est certainement un très bon exemple de ce type d'estuaire, au même titre que la Gironde. Par contre, d'autres estuaires, par leur topographie, s'opposent plus ou moins à la pénétration du flot. L'embouchure de la Seine, celle de l'Aulne et celle de la Loire ne sont certes pas semblables et le flot n'a pas partout la même facilité pour remonter le cours inférieur.

Cette importance de la forme pour la propagation de l'onde de marée dans les estuaires n'est d'ailleurs pas faite pour surprendre, et on sait depuis longtemps que les phénomènes de marée le long des côtes, ou même dans un bassin donné, sont liés à la topographie de ces côtes et de ce bassin, et que c'est elle qui, par exemple, explique le phénomène de résonance et par conséquent la possibilité, pour tel ou tel point, de subir une marée diurne ou deux marées semi-diurnes. On se rend facilement compte que, dans un estuaire à l'échelle de l'Amazone, la topographie doit prendre toute son importance.

## 2. — La propagation de la marée.

Dans les estuaires d'une certaine importance (navigation), des marégraphes sont échelonnés depuis l'embouchure jusqu'au point le plus éloigné en amont où se fait sentir la marée.

La Seine, la Loire, la Charente, la Gironde, etc..., possèdent de tels marégraphes. Ce n'est malheureusement pas le cas pour les estuaires bretons. Ainsi, il n'existe sur l'Aulne qu'une simple échelle à marée à l'écluse de Guily-Glas.

Le débit fluvial, très bien connu dans ses variations au cours de l'année pour les grands fleuves, l'est beaucoup moins bien, ou pas du tout, pour des rivières plus petites comme la Penzé. Comme le but poursuivi ici n'est pas d'étudier quantitativement ces facteurs pour un estuaire donné, il suffira de rappeler les lois essentielles de l'hydrodynamique dans un estuaire prototype et de donner un ou deux exemples démonstratifs.

Le phénomène de la marée se traduit sur les côtes, d'une part, par une montée du niveau de l'eau et, d'autre part, par une onde de marée qui se propage. Ce courant est naturellement déterminé par une pente hydraulique. Dans les estuaires, par suite des

conditions géographiques, le courant de marée acquiert des vitesses très grandes. Mais ce courant — il s'agit du flot — se heurte à un obstacle plus ou moins sérieux suivant l'époque de l'année : le courant propre de la rivière (dont la vitesse dépend du débit). En jusant, le courant de marée et le courant fluvial se font sentir dans le même sens, ce qui facilite l'évacuation de l'eau amenée par le flot.

La plus ou moins grande pénétration du flot dans un estuaire est fonction : 1° de la pente du lit; 2° du débit liquide fluvial; 3° du coefficient de marée; 4° des obstacles naturels et artificiels, méandres, digues, etc...; 5° du vent.

1. INFLUENCE DE LA PENTE DU LIT SUR LA PROPAGATION DE LA MARÉE. — Cette influence est évidente et c'est elle qui limite justement la portion du cours inférieur d'un fleuve qui subit la marée. La pente moyenne est constante dans le temps (il ne s'agit naturellement pas du temps géologique) pour un même cours d'eau. Elle déterminera la possibilité pour la Seine de se laisser remonter jusqu'en amont de Rouen, et pour la Penzé de n'être influencée par la marée que sur quelques kilomètres. Il est évident que si la pente d'un estuaire prenait une valeur torrentielle, la marée ne pourrait vaincre le courant fluvial et elle ne se ferait plus sentir en amont de l'embouchure.

2. INFLUENCE DU DÉBIT FLUVIAL. — Elle est considérable et c'est elle qui règle principalement la plus ou moins grande pénétration de l'onde de marée dans l'estuaire. L'été (régime d'étiage) et l'hiver (régime de crues), sont totalement différents. Ainsi sur l'Aulne (Dinéault, à 12 km. de l'embouchure), au mois de décembre, et sur le Bou-Regreg (Tour Hassan, à 2 km. 200 de l'embouchure, en périodes de crues), le courant de flot est nul en surface, ce qui n'empêche d'ailleurs pas la marée de se faire sentir et l'eau de monter. A ces époques, il existe donc deux courants superposés et de directions opposées : le courant fluvial en surface et le courant de flot au fond. Un phénomène semblable m'a été signalé comme se produisant dans la Loire maritime à Saint-Nazaire; mais je ne l'ai pas personnellement observé, n'étant pas présent à l'époque voulue. Sur la Tees également, il a été constaté.

L'importance du débit fluvial apparaît nettement quand on étudie la salinité des eaux. On reviendra sur ce sujet. Ainsi, pour un même estuaire, la marée se fait sentir, plus ou moins loin, suivant la valeur du débit fluvial, donc suivant l'époque de l'année. Pour les rivières bretonnes, le maximum de débit fluvial a lieu en hiver (mois de novembre, décembre, janvier), et le minimum en été (août, septembre). Cette règle est également vraie, à peu de choses près, pour les estuaires marocains où l'époque des crues importantes se place habituellement vers les mois de décembre-janvier-février. En été, le débit est insignifiant (Bou-Regreg), quand il ne devient pas nul, pour des oueds de moindre importance.

Je n'ai pas cru devoir donner ici les valeurs du débit fluvial pour les rivières étudiées. Ces chiffres me semblent superflus, puisque je n'ai pas tenté de les utiliser dans l'étude du problème du mélange eau douce - eau salée. Ce qu'il faut simplement retenir, ce sont les oppositions essentielles qu'il y a entre le régime de débit d'été et celui d'hiver. Dans le cas des petits estuaires bretons, ces oppositions sont fondamentales (de même pour le Bou-Regreg); toutefois, en ce qui concerne la Loire, il ne faut pas oublier que, si la période des crues se situe bien en hiver, le débit est tout de même important en étiage : il s'agit d'un fleuve possédant un bassin versant couvrant une vaste aire géographique.

3. INFLUENCE DU COEFFICIENT DE MARÉE : MORTES EAUX ET VIVES EAUX. — Toutes choses égales d'ailleurs, l'onde de marée se fait sentir d'autant plus en amont dans l'estuaire que le coefficient de marée est plus élevé. L'expression « coefficient de marée » ne fait que concrétiser, en un chiffre, un phénomène maritime de la plus haute importance : celui de l'amplitude de la marée en fonction de la position de la lune et du soleil.

Avec la quadrature, on observe des marées de faible amplitude : les mortes eaux ; avec l'opposition ou la conjonction, des marées de grande amplitude : les vives eaux. L'amplitude de la marée se définit par la différence de hauteur du niveau de l'eau à basse mer et de ce même niveau à haute mer. En vives eaux, la marée atteint un niveau maximum à haute mer et minimum à basse mer ; en mortes eaux, au contraire, la différence de niveau est faible. Ces phénomènes se traduisent très nettement dans les estuaires où, en vives eaux, alternativement, le flot (donc les eaux salées) pénètrent le plus en amont et le jusant (donc les eaux douces) gagnent le plus vers la mer ; en mortes eaux, au contraire, la variation, au cours de la marée, du volume d'eau emmagasiné étant faible, les variations de salinité seront minima. Tout ceci est connu depuis longtemps et, si je répète de tels liens communs, c'est qu'il n'est pas inutile d'insister sur le fait absolument essentiel qu'il y a à préciser le coefficient de marée lorsqu'on décrit les phénomènes hydrodynamiques ou les variations du milieu physicochimique dans les estuaires. Si on n'en tient pas compte, les observations perdent une grande partie de leur signification et, en tout cas, ne permettent pas d'être comparées à d'autres observations effectuées en des points et à des époques différents.

Le volume d'eau introduit par le flot dans un estuaire varie considérablement avec l'amplitude de la marée, et rien n'est plus démonstratif à ce sujet que les valeurs données par GIBERT (1941) pour la Loire maritime.

Mètres cubes introduits par le flot en amont de certaines sections de référence :

|                                   | Saint-Nazaire | Paimbœuf    | La Martinière | Nantes-Chantenay |
|-----------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|
| Vives eaux :                      |               |             |               |                  |
| 21 oct. 1937 (coeff. : 108) ..... | 311.300.000   | 125.100.000 | 28.200.000    | 13.400.000       |
| Mortes eaux :                     |               |             |               |                  |
| 3 oct. 1937 (coeff. : 34) .....   | 114.000.000   | 50.300.000  | 10.700.000    | 3.250.000        |

On voit par ce tableau que le volume d'eau introduit par le flot dans l'estuaire est, en vives eaux, deux fois plus élevé qu'en mortes eaux.

Un autre tableau donné par le même auteur indique les débits de marée et les vitesses moyennes constatées aux vives eaux et aux mortes eaux, toujours dans l'estuaire de la Loire.

Ainsi, comme le remarque l'auteur, « l'onde de marée met en mouvement, à Saint-Nazaire, des débits qui sont, en flot, quatre fois et en jusant, trois fois supérieurs à ceux des plus fortes crues de la Loire (6.000 m<sup>3</sup> environ à Nantes) : on peut juger par là de la puissance du phénomène des marées, même dans une embouchure de faibles dimensions ». En amont de la Martinière (à 35 km. en amont de l'embouchure), le régime fluvial prend la prépondérance.

| Maxima                                                          | Saint-Nazaire |        | Paimbœuf |        | La Martinière |        | Nantes-Chantenay |        |
|-----------------------------------------------------------------|---------------|--------|----------|--------|---------------|--------|------------------|--------|
|                                                                 | Flot          | Jusant | Flot     | Jusant | Flot          | Jusant | Flot             | Jusant |
| Vives eaux :                                                    |               |        |          |        |               |        |                  |        |
| 21 oct. 1937 (coeff. : 108), débits en m <sup>3</sup> /sec..... | 23.600        | 18.200 | 11.000   | 6.750  | 2.600         | 1.920  | 1.070            | 1.150  |
| Vitesses moyennes en m./sec.                                    | 1,21          | 1,01   | 1,09     | 0,85   | 1,30          | 0,88   | 0,50             | 0,50   |
| Mortes eaux :                                                   |               |        |          |        |               |        |                  |        |
| 13 oct. 1937 (coeff. : 34), débits en m <sup>3</sup> /sec.....  | 10.350        | 8.900  | 4.350    | 3.300  | 1.200         | 950    | 470              | 530    |
| Vitesses moyennes en m./sec.                                    | 0,59          | 0,52   | 0,55     | 0,50   | 0,65          | 0,53   | 0,23             | 0,28   |

Ces quelques valeurs suffisent à donner une idée de l'importance de la marée dans un estuaire, et aussi de l'intérêt qu'il y a à distinguer les vives eaux des mortes eaux.

4. INFLUENCE DE LA TOPOGRAPHIE DE L'ESTUAIRE : OBSTACLES ARTIFICIELS ET NATURELS (ILES, BANCS, MÉANDRES, ETC...). — Il existe, avant de parler des obstacles naturels à la propagation de la marée, des obstacles créés par les hommes. Je les ai déjà signalés : presque toutes les rivières bretonnes possèdent de petits barrages qui sont utilisés pour l'alimentation de moulins, aujourd'hui presque toujours abandonnés. A côté de ces murs, on trouve aussi des barrages écluses dont le but est de faciliter la navigation en amont : écluse de Guily-Glas, sur l'Aulne, du Chatelier sur la Rance, du port de Morlaix, du port de Caen, etc... Dans ce cas, toutes les marées ne peuvent dépasser le barrage : seules celles de vives eaux, et encore en période d'étiage, en ont la possibilité. Dans les petits estuaires précités, le passage de l'onde de marée dans la partie amont du barrage (qui peut aussi avoir lieu par le simple jeu de l'éclusage), donne lieu à des phénomènes très nets de non-mélange des eaux douces et marines (Aulne). Le cas de la remontée du flot dans la partie située en amont du barrage a donné lieu aux intéressantes recherches de P. CHAUCHARD (1939) dans l'estuaire de la Rance, sur lesquelles je reviendrai.

Les obstacles naturels, l'homme s'efforce chaque jour de les supprimer, du moins dans les estuaires navigables. La Loire, en particulier, possède à son embouchure d'importants bancs de sable qui ne sont pas sans gêner la pénétration du flot. Ces bancs, situés dans l'axe de l'estuaire, déterminent deux chenaux et par conséquent une diminution de la puissance du courant. Les faux bras qui existaient dans cet estuaire avaient le même inconvénient. Les travaux exécutés depuis de longues années améliorent, chaque jour, ces conditions en fermant les faux bras, en supprimant un des chenaux, par comblement naturel, au profit de l'autre. De la sorte, le chenal, qui demeure, emmagasine un plus grand volume d'eau et par conséquent favorise une plus grande vitesse du courant et une tendance à son entretien naturel.

Dans de nombreux autres estuaires, comme celui du Bou-Regreg, existent, à l'embouchure, des barres sableuses ou des îles, qui gênent aussi la libre pénétration du flot : des dragages continuels permettent souvent d'obvier à un tel inconvénient. Les estuaires bretons, à l'exception des obstacles artificiels, ne possèdent pour ainsi dire pas d'obstacles naturels (îles ou bancs de sable). Par contre, les méandres de l'estuaire ne sont pas faits pour favoriser une accentuation de la vitesse du courant. Aussi cherche-t-on parfois à les

supprimer : c'est, en somme, le but principal des digues construites en aval de Tancarville, dans la Seine maritime. Celle, notamment, qui doit atteindre Honfleur doit améliorer dans une large mesure l'emmagasinement du flot et, par conséquent, doit permettre à des navires de tonnages plus importants de remonter jusqu'à Rouen.

Les exemples de cet ordre pourraient être multipliés.

5. INFLUENCE DU VENT. — En haute mer, on sait que la cause essentielle des grands courants superficiels est le vent. Près des côtes, en général, cette cause disparaît, dominée par la marée qui, par suite des conditions géographiques, prend la place prépondérante. Dans les estuaires, comme on vient de le voir, ce sont les courants de marée qui sont seuls remarquables. Il n'en est pas moins vrai que le vent peut parfois jouer un certain rôle. Des auteurs russes, biologistes, qui ont étudié les migrations génétiques potamotoques de certains poissons, ont remarqué que parfois ceux-ci n'étaient pas dans la possibilité de remonter l'embouchure d'un fleuve par suite d'un vent à direction parallèle à celle du courant. Dans ce cas, en effet, son influence serait telle qu'il déterminerait une accentuation très grande de la vitesse du courant et, par conséquent, un abaissement du niveau de l'eau au point que les poissons ne trouveraient plus assez d'eau. Ce phénomène, s'il a été exactement observé et si son interprétation est juste, ce dont, malgré tout, il est permis de douter, n'en reste pas moins extraordinaire. Il est vrai qu'il s'agit de fleuves aboutissant à une mer aux marées insignifiantes et où les courants qui en sont la conséquence sont inexistants. En tout cas, en ce qui concerne les estuaires du littoral de la Manche et de l'Atlantique, il ne m'a pas été donné de faire de telles observations et je n'en connais pas dans la littérature.

Cependant, le vent peut malgré tout influencer plus ou moins fortement la direction ou la vitesse des courants de surface : ainsi dans l'Aulne dont l'estuaire, très encaissé, est particulièrement bien conditionné pour que l'influence du vent y soit aussi intense que possible. Il est, en effet, canalisé dans une direction parallèle à celle du lit du fleuve. Il arrive souvent que la direction du vent change avec la marée et se stabilise durant tout un flot ou tout un jusant. Dans ces conditions, le vent peut ralentir ou accélérer dans une assez forte mesure la vitesse du courant. Il arrive même que sa violence soit telle qu'il ne permette pas à la marée montante d'atteindre le niveau prévu avec le coefficient de marée. C'est un fait d'observation d'ailleurs banal et qui m'a été signalé comme se produisant aussi en Loire. Cela n'a rien d'étonnant et PIERRE DRACH, au cours d'une « marée » sur une plage voisine de Roscoff, en mer ouverte, a pu montrer que, par suite du vent contraire au jusant, celui-ci n'avait pas atteint, tant s'en faut, le niveau prévu (niveau plus facilement délimitable, puisqu'ici il n'y a pas d'influence possible d'un courant fluvial).

Enfin, on ne doit pas oublier que la houle du large ne se propage pas dans les estuaires. Très généralement, la surface de l'eau est calme ou à peine ridée. Il arrive cependant qu'il s'établisse un clapotis assez fort, des vagues courtes et heurtées : c'est que le vent souffle dans une direction opposée à celle du courant (flot ou jusant). Quand la marée se renverse, le calme se rétablit la plupart du temps.

### 3. — Temps de propagation de la marée. Durée du flot et durée du jusant.

Comme je l'ai déjà dit, dans les estuaires étudiés, il ne se fait jamais sentir plus d'une onde de marée à la fois. Cela veut donc dire que le jusant est terminé lorsqu'un nouveau flot se présente à l'embouchure. L'onde de marée met un certain temps pour parcourir l'estuaire et il est évident que l'heure de haute mer à l'embouchure n'est pas la même que dans les parties plus en amont. Le retard est naturellement proportionnel à la distance que l'onde doit parcourir avant d'atteindre en amont le point déterminé d'observation.

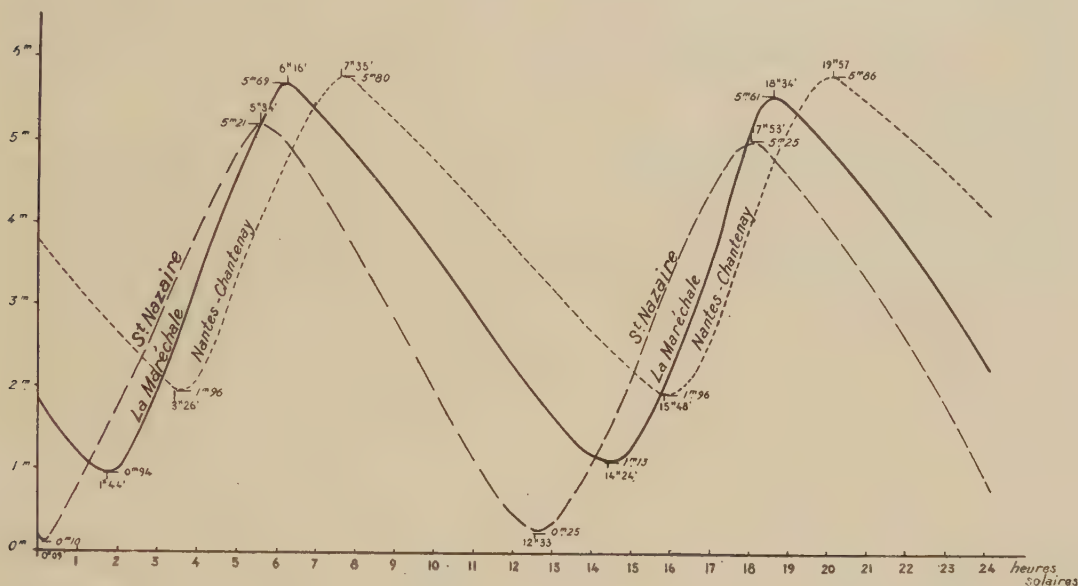


FIG. 10. — Courbes marégraphiques en différents points de l'estuaire de la Loire.

Dans l'estuaire de la Loire, en période de faible débit fluvial (cote à Montjean de 1 m.), et par un coefficient de marée de 97, voici quels sont les retards subis :

|                                          | H.               | H.                |
|------------------------------------------|------------------|-------------------|
| A Saint-Nazaire .....                    | Haute mer à 5 34 | Basse mer à 12 33 |
| A la Maréchale (à 21 km. en amont) ..... | » 6 16           | » 14 24           |
| Chantenay (50 km. en amont) .....        | » 7 55           | » 15 48           |

Ainsi, à 21 km. de l'embouchure, le retard pris par l'onde de flot est de 43 minutes et, à 50 km., il est de 2 heures 20 minutes. Quant au retard que subit l'heure de la basse mer, il est déjà de 1 heure 50 minutes à la Maréchale, et de 3 heures 15 minutes à Chantenay (Nantes). L'examen des courbes marégraphiques (fig. 10) souligne très bien la prépondérance (dans le temps) toujours plus grande du jusant sur le flot à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure.

Dans le petit estuaire de la Penzé, de pareils phénomènes sont observables et, chose étonnante, malgré la faible dimension de l'estuaire (environ 15 km. de partie vraiment fluvio-marine, et 15 km. en baie de Morlaix entre Carantec et Roscoff), le retard subi par le flot au village de Penzé est plus grand que celui constaté à Chantenay-Nantes.

## HEURE DE LA BASSE MER A ROSCOFF : 11 H. 09. MARÉE DE VIVE EAU - ETÉ

| Points d'observation           | Commencement<br>du courant de flot | Retard sur Roscoff |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|
|                                | H.                                 | H.                 |
| Roscoff (km. 0).....           | 11 09                              | Nul.               |
| Pont de la Corde (km. 20)..... | 12 15                              | 1 06               |
| Penzé-village (km. 30).....    | 14 45                              | 3 36               |

Comme, par ailleurs, au village de Penzé, le jusant commence à se faire sentir dès l'heure de l'étalement de haute mer à Roscoff, on voit que le flot ne dure que trois heures à peine. Le retard très grand subi par l'onde de flot, entre le Pont de la Corde et le village de Penzé, est explicable par la petitesse du lit de l'estuaire et l'important freinage (forces de frottement).

J'ai pu faire des remarques analogues sur le Bou-Regreg et notamment à la passerelle de l'oued Akrech, à 18 km. en amont de l'embouchure, où le flot ne dure aussi qu'un petit nombre d'heures par rapport à la grande étendue du jusant. Là aussi, il est nécessaire de faire appel aux forces de frottement d'autant plus accentuées par l'existence d'îles à 5 km. de la passerelle.

G. DE JOLY donne un tableau qui révèle des faits similaires dans d'autres estuaires :

| Estuaires                       | Vive eau<br>Durée de la marée : |             | Morte eau<br>Durée de la marée : |             |
|---------------------------------|---------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
|                                 | montante                        | descendante | montante                         | descendante |
|                                 | H. M.                           | H. M.       | H. M.                            | H. M.       |
| Adour (Tour des Signaux) .....  | 4 50                            | 7 18        | 6 24                             | 6 22        |
| Loire (Saint-Nazaire).....      | 5 50                            | 7 13        | 6 20                             | 2 26        |
| Charente (Port-de-Bouques)..... | 4 25                            | 7 53        | 6 35                             | 6 11        |
| Charente (Rocheport).....       | 4                               | 8 18        | 6 32                             | 6 14        |
| Seine (Honfleur).....           | 2 32                            | 7 19        | 4 33                             | 8 10        |
| Seine (La Risle).....           | 2 30                            | 2 30        | 4 23                             | 8 20        |

L'estuaire de la Seine présente une curieuse anomalie très visible sur les courbes marégraphiques : il n'y a pas qu'une seule pleine mer, mais deux pleines mers. Elles sont distantes d'environ deux heures et la dépression qui les sépare est de l'ordre de quelques centimètres à 1 m. Jusqu'à Duclair, c'est la première pleine mer qui est la plus haute; en amont de Duclair, c'est la seconde et, à Rouen, le phénomène est très nettement atténué.

Les mouvements de la marée dans l'estuaire de la Tees ont donné lieu à des recherches approfondies de la part des Anglais. Je noterai ici des résultats analogues à ceux déjà constatés : « la 5<sup>e</sup> Bouée », à l'embouchure de la Tees, est prise comme référence et les auteurs ont pu constater les retards croissants de la haute mer et de la basse mer à mesure que l'on remonte l'estuaire. Voici les retards notés :

|                                                | Haute mer    | Basse mer         |
|------------------------------------------------|--------------|-------------------|
| Preston (20 km. en amont de l'embouchure)..... | 35 minutes.  | 1 h. 15 à 1 h. 55 |
| Varm (26 km. en amont de l'embouchure).....    | 40 m. à 1 h. | 3 h. 40 à 4 h.    |

Les retards sont plus ou moins importants suivant le coefficient de marée.

La comparaison des observations faites en Loire et dans l'estuaire de la Penzé et de la Tees fait ressortir un phénomène assez curieux : le retard que subit l'heure de basse mer est nettement plus important (4 h. à 26 km. de l'embouchure pour la Tees) dans les petits estuaires que dans la Loire (retard de 3 h. à 50 km. en amont de l'embouchure). Une telle différence n'est explicable que si l'on tient compte des conditions géographiques des estuaires considérés, ainsi que de l'importance relative du débit fluvial.

Toujours est-il, et c'est l'essentiel de ce que l'on doit retenir, que la durée du flot diminue dès que l'on s'éloigne de l'embouchure, et que corrélativement celle du jusant augmente.

#### 4. — Nature et régime des courants.

La propagation de la marée dans un estuaire se manifeste, comme le long des côtes, par des courants. Par suite des conditions géographiques, ces courants prennent des vitesses considérables, analogues (et parfois supérieures) à celles observées dans les détroits (comme le Raz de Sein ou le Raz Blanchard). Courant de flot et courant de jusant se font alternativement sentir et pendant un temps plus ou moins long, suivant le degré d'éloignement de l'embouchure.

Au courant de flot, s'oppose le courant fluvial. Au courant de jusant, s'ajoute le courant fluvial. L'un voit donc sa vitesse constamment freinée et l'autre accélérée. C'est ce que l'on constate par des mesures dans bien des cas; mais, parfois aussi, c'est l'inverse qui se produit.

VITESSE DES COURANTS DE MARÉE MESURÉE DANS L'ESTUAIRE DE LA TEES (1). — Il ne peut être question ici de reprendre tous les résultats donnés dans ce travail : il faudrait y consacrer un volume entier. On notera seulement, pour commencer, les vitesses maxima mesurées d'amont en aval tant pour le flot que pour le jusant :

| Distances en mètres<br>à partir de l'embouchure |                        | Flot                   |                         |                                            | Jusant                 |                         |                                            |
|-------------------------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
|                                                 |                        | Vitesses<br>en m./sec. | Profondeur<br>en mètres | Heure<br>avant celle<br>de la<br>haute mer | Vitesses<br>en m./sec. | Profondeur<br>en mètres | Heure<br>après celle<br>de la<br>haute mer |
| I.                                              | 1.700 m. en amont..... | 1,70                   | 4                       | 2 30                                       | 1,63                   | Surface.                | 3                                          |
| II.                                             | 5.300 » » .....        | 1,33                   | 10                      | 2 45                                       | 1,30                   | »                       | 3 30                                       |
| III.                                            | 7.500 » » .....        | 0,80                   | 4                       | 2 30                                       | 1,17                   | »                       | 4                                          |
| IV.                                             | 9.300 » » .....        | 0,62                   | 4                       | 3                                          | 1                      | »                       | 4                                          |
| V.                                              | 13.000 » » .....       | 0,66                   | 4                       | 2 30                                       | 1,06                   | »                       | 3 45                                       |
| VI.                                             | 13.000 » » .....       | 0,87                   | 4                       | 2 30                                       | 1,20                   | »                       | 4 30                                       |
| VII.                                            | 15.000 » » .....       | 1,23                   | 4                       | 2 30                                       | 1,63                   | »                       | 4                                          |
| VIII.                                           | 17.000 » » .....       | 1,03                   | 2                       | 2                                          | 1                      | »                       | 4                                          |

Les valeurs figurées dans ce tableau ont été mesurées pendant des marées de vives eaux (4 m. 70) et un débit fluvial d'été (fig. 11).

(1) Les mesures de courants dans l'estuaire de la Tees ont été poussées très loin. Elles ont été effectuées à l'aide de flotteurs (pour les courants de surface) et de moulinets (pour les couches profondes). Il est inutile de dire que de telles observations demandent un équipement en matériel, en personnel et en embarcations, que je n'ai jamais eu à ma disposition. Tout ce que je peux dire, c'est que des mesures ont été effectuées, en Loire, en ma présence.

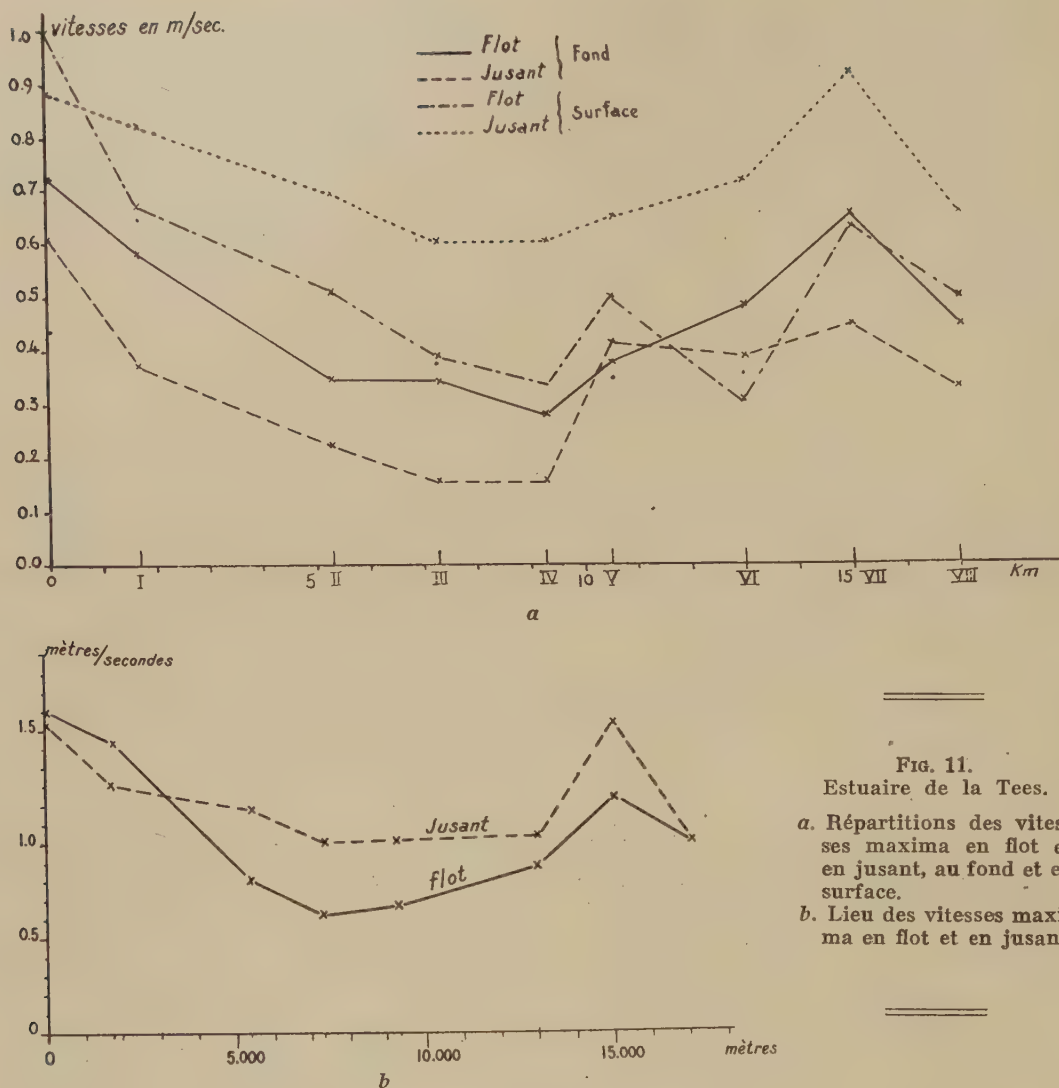


FIG. 11.  
Estuaire de la Tees.

a. Répartitions des vitesses maxima en flot et en jusant, au fond et en surface.  
b. Lieu des vitesses maxima en flot et en jusant.

Ces valeurs sont maxima et, comme l'on peut s'en douter, avec des coefficients de marée moins forts, les vitesses atteintes seront moins élevées. Un exemple suffira pour illustrer ces faits: on prendra celui de la station d'observation située à 5.300 m. en amont :

| Hauteur de la marée     | Flot : vitesses m./sec. | Jusant : vitesses m./sec. |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 2 m. 70 .....           | 0,26                    | 0,43                      |
| 2 m. 70 - 3 m. 70 ..... | 0,47                    | 0,61                      |
| 3 m. 70 - 4 m. 70 ..... | 0,54                    | 0,66                      |
| 4 m. 70 .....           | 0,80                    | 0,17                      |

Il est assez intéressant de noter que la vitesse du courant de flot atteint sa valeur maximum environ 2 h. 30 avant la haute mer et à une profondeur de 4 m. (fig. 12). Le tableau suivant

donne, par exemple, les différentes valeurs du courant de flot et du courant de jusant suivant une verticale au moment de leur valeur maximum :

| Profondeurs en mètres | Flot (vitesses en m./sec.)<br>2 h. 30 avant la haute mer |                                       | Jusant (vitesses en m./sec.)<br>3-4 heures après la haute mer |                                       |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
|                       | Embouchure,<br>vitesses maxima                           | 7.500 m. en amont,<br>vitesses minima | Embouchure,<br>vitesses maxima                                | 7.500 m. en amont,<br>vitesses minima |
| Surfaces :            |                                                          |                                       |                                                               |                                       |
| 2 m. ....             | 1,64                                                     | 0,547                                 | 1,49                                                          | 0,75                                  |
| 2 m. - 4 m. ....      | 1,66                                                     | 0,58                                  | 1,41                                                          | 0,51                                  |
| 4 m. - 6 m. ....      | 1,65                                                     | 0,547                                 | 1,36                                                          | 0,40                                  |
| 6 m. - 8 m. ....      | 1,61                                                     | 0,47                                  | 1,29                                                          | 0,27                                  |
| 8 m. - 10 m. ....     | 1,54                                                     | 0,23                                  | 1,24                                                          | 0,10                                  |
| 10 m. - 12 m. ....    | 1,41                                                     | 0,10                                  | 1,20                                                          | —                                     |
| 12 m. - 14 m. ....    | 1,27                                                     | —                                     | 1,16                                                          | —                                     |
| 14 m. - 16 m. ....    | 1,13                                                     | —                                     | 1,07                                                          | —                                     |
| 16 m. - 18 m. ....    | 0,77                                                     | —                                     | 0,90                                                          | —                                     |

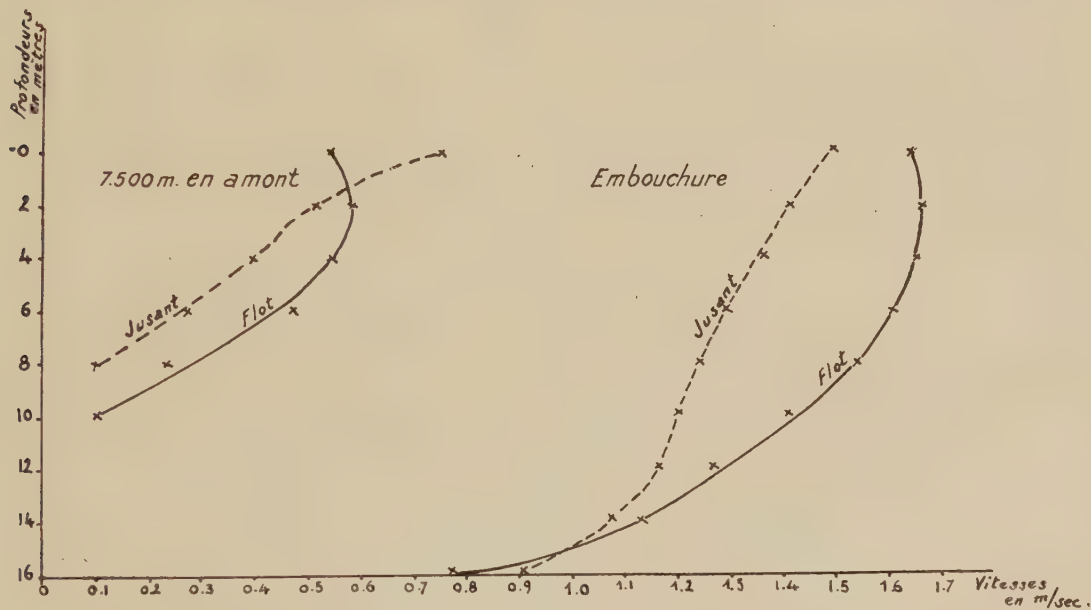


FIG. 12. — Estuaire de la Tees. Répartition des vitesses maxima suivant la profondeur.

J'ai choisi les stations d'observations : 1° à l'embouchure où les vitesses de courant sont supérieures à celles de toute autre station de l'estuaire, et 2° celle située 7.500 m. en amont, où les vitesses sont minima. A tout moment de la marée, les vitesses de courant suivent les mêmes lois, mais les valeurs atteintes sont seulement moins élevées.

On peut enfin donner un exemple des graphiques obtenus sur l'estuaire de la Tees pour la variation de la vitesse du courant avec l'heure de la marée et avec la profondeur (fig. 13).

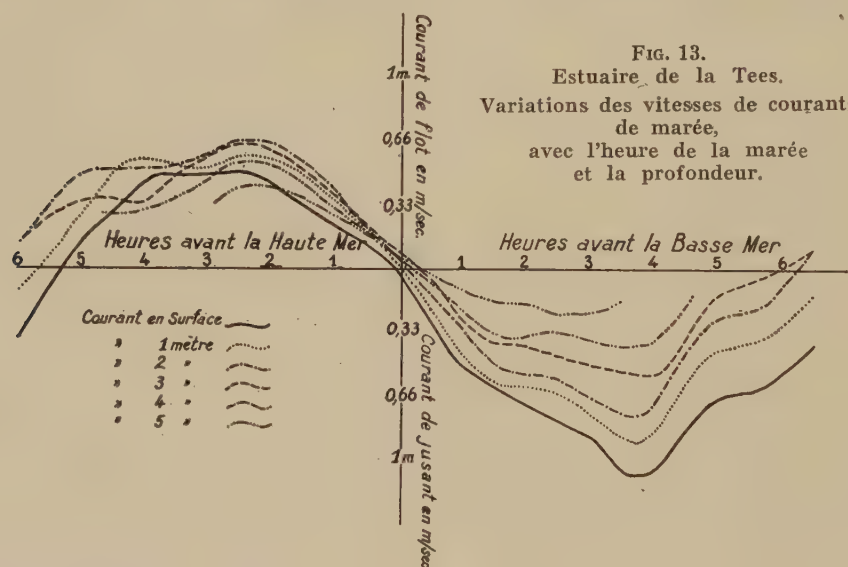
Ces graphiques font apparaître nettement l'influence du coefficient de marée (pour un même débit fluvial).

VITESSES DES COURANTS DE MARÉE DANS L'ESTUAIRE DU BOU-REGREG. — Les résultats que j'ai obtenus dans cet estuaire marocain par des mesures personnelles, en surface, à l'aide de *flotteurs en liège*, n'ont rien de comparable à ceux, si remarquables, de l'équipe qui a travaillé dans

l'estuaire de la Tees. Seul, sur une embarcation à rames, sans appareillage, je ne pouvais faire grand chose dans cette voie.

| Flot :<br>heures après la haute mer   | Tour Hassan :<br>2 k. 200 m. en amont | Halte de Robinson :<br>6 km. en amont | Ferme Gibert :<br>14 km. en amont | Oued Akrech :<br>18 km. en amont |
|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 8-7 .....                             |                                       |                                       |                                   |                                  |
| 7-6 .....                             | +0,40                                 | +0,705                                | +0,17                             | —                                |
| 6-5 .....                             | +0,60                                 | +0,705                                | +0,17                             |                                  |
| 5-4 .....                             | +0,60                                 | +0,66                                 | +0,17                             | +                                |
| 4-3 .....                             | +0,90                                 | +0,66                                 | +0,66                             | +                                |
| 3-2 .....                             | +0,705                                | +0,60                                 | +0,60                             | +                                |
| 2-1 .....                             | +0,47                                 | +0,10                                 | +0,25                             | +                                |
| 1-0 .....                             | +0,30                                 |                                       |                                   |                                  |
| <hr/>                                 |                                       |                                       |                                   |                                  |
| Jusant :<br>heures après la haute mer |                                       |                                       |                                   |                                  |
| 0-1 .....                             | +0,117                                | +0,17                                 | +                                 | +                                |
| 1-2 .....                             | +0,37                                 | +0,133                                | +                                 | +                                |
| 2-3 .....                             | —0,37                                 | —0,23                                 | —                                 | —                                |
| 3-4 .....                             | —0,40                                 | —0,37                                 | —                                 | —                                |
| 4-5 .....                             | —0,417                                | —0,60                                 | —                                 | —                                |
| 5-6 .....                             | —                                     | —0,37                                 | —                                 | —                                |
| 6-7 .....                             | —0,37                                 | —0,37                                 | —                                 | —                                |

Le courant de flot est indiqué par le signe (+), celui de jusant par (—).



Les mesures du courant de flot ont été effectuées par une hauteur de marée de 3 m. 30, et celles de jusant par 2 m. 70. Le débit fluvial était insignifiant (étiage) dans les deux cas. La différence de vitesse au profit du flot s'explique donc.

Les stations d'observation qui ne comportent que des signes sont celles où il n'a pas été possible d'accéder en bateau.

La considération de ces tableaux permet de faire certaines remarques :

*En flot* (fig. 14). — A la Tour de Hassan, la vitesse du courant est maximum deux heures avant la haute mer (analogie avec la Tees, la Loire et tous les estuaires en géné-

ral), alors que, 4 km. plus en amont, elle est maximum au début du flot, tandis qu'à 8 km. encore en amont, elle est de nouveau maximum en fin de marée. Ces faits, particuliers au Bou-Regreg, demandent à être interprétés. J'envisage donc l'explication suivante :

A l'étale de basse mer, le niveau de l'eau (pente hydraulique) est sensiblement horizontal. Dès que la mer monte, il s'établit une différence de niveau entre les points situés à l'embouchure et ceux qui sont en amont dans l'estuaire. Cette pente permet d'expliquer l'accroissement de vitesse que prend le courant. Ceci est valable tant que l'estuaire, par sa forme topographique, ne freine pas trop l'avance de l'onde de marée; mais, dès que le courant doit franchir des méandres, il bute contre les parois des rives concaves : il y a consommation d'énergie et diminution de la vitesse (0 m. 40 à la Tour Hassan, 0 m. 705 à la Halte de Robinson, 0 m. 17 à la Ferme Gibert). Par la suite, on s'explique

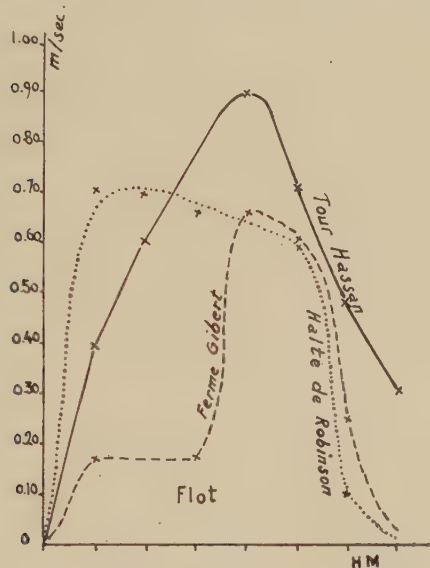


FIG. 14.

FIG. 14. — Variations de la vitesse du courant de flot, en surface, en différents points de l'estuaire du Bou-Regreg.

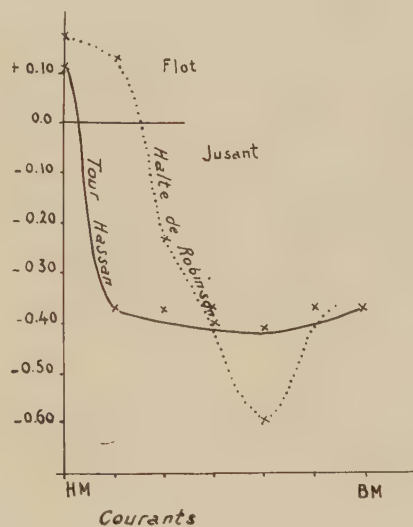


FIG. 15.

FIG. 15. — Variations de la vitesse du courant de jusant, en surface, en différents points de l'estuaire du Bou-Regreg.

plus mal la diminution de la vitesse à la Halte de Robinson quand l'heure de la haute mer approche. C'est peut-être l'imprécision de la méthode de mesure qu'il faut rendre responsable. Pourtant, on retrouve des phénomènes à peu près identiques dans l'estuaire de la Tees. Le graphique du lieu des vitesses maxima indique bien que la vitesse des courants n'est pas constamment décroissante en allant vers l'amont, mais qu'elle passe par un minimum situé à une dizaine de kilomètres en amont de l'embouchure.

*En jusant* (fig. 15). — La vitesse maximum du courant de jusant s'observe environ 4 heures après la haute mer (encore une analogie avec l'estuaire de la Tees) aux deux stations d'observation.

Il faut noter aussi que la vitesse maxima atteinte est plus élevée à la Halte de Robinson qu'à la Tour Hassan.

REMARQUES GÉNÉRALES. — D'après ces différents tableaux et graphiques, on peut noter : 1° Que la vitesse du courant de flot est maximum environ 2 heures avant la haute mer. — 2° Que la vitesse du courant de jusant est maximum environ 4 heures après la haute mer. — 3° Que les vitesses atteintes par les courants de marée dans un estuaire dépendent du volume d'eau emmagasiné, c'est-à-dire du coefficient de marée (pour un débit fluvial constant bien entendu). — 4° Que le courant de flot atteint sa vitesse maximum à une certaine profondeur (entre 2 et 4 m. de profondeur dans la Tees). — 5° Que le courant de jusant atteint toujours sa vitesse maximum en surface. — 6° Que la vitesse des courants de marée n'est pas régulièrement décroissante d'amont en aval, ou d'aval en amont, mais qu'elle est fonction de la forme du lit (1) (resserrement, etc...). — 7° Que, généralement, les vitesses atteintes par le jusant sont plus élevées que celles du flot. En certains cas, pour une même marée, par suite de conditions particulières (d'ordre géographique ou climatique (vent), le contraire peut exister. — 8° Que le courant de flot commence toujours à se faire sentir par le fond. Au début de la marée montante, on constate que, tandis qu'au fond se manifeste déjà un courant sensible, en surface, au contraire, demeure un faible jusant. Cet état de chose est vrai dans l'estuaire de la Tees, en moyenne pendant la première heure de flot. Inversement, il arrive, en bien des points, que le jusant commence à être sensible en surface en fin de marée montante, tandis qu'en profondeur subsiste un courant de flot atténué, mais net.

On peut donner, comme exemple, la station située à 7.500 m. en amont de l'embouchure, par une hauteur de marée de 3 m. 70 :

| Profondeurs        | Heures avant la haute mer |        |        |        |        |        |
|--------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 6-5                       | 5-4    | 4-3    | 3-2    | 2-1    | 1-0    |
| Surfaces :         |                           |        |        |        |        |        |
| 2 m. ....          | -0,027                    | +0,14  | +0,247 | +0,323 | +0,18  | -0,127 |
| 2 m. - 4 m. ....   | +0,087                    | +0,277 | +0,363 | +0,423 | +0,253 | +0,03  |
| 4 m. - 6 m. ....   | +0,207                    | +0,36  | +0,407 | +0,453 | +0,33  | +0,19  |
| 6 m. - 8 m. ....   | +0,1                      | +0,233 | +0,32  | +0,383 | +0,37  | +0,247 |
| 8 m. - 10 m. ....  | —                         | —      | +0,16  | +0,2   | +0,353 | +0,237 |
| 10 m. - 12 m. .... | —                         | —      | —      | —      | +0,16  | +0,1   |

| Profondeurs        | Heures après la haute mer |       |        |        |        |        |        |
|--------------------|---------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                    | 0-1                       | 1-2   | 2-3    | 3-4    | 4-5    | 5-6    | 6-6,5  |
| Surfaces :         |                           |       |        |        |        |        |        |
| 2 m. ....          | -0,32                     | -0,41 | -0,49  | -0,583 | -0,56  | -0,35  | -0,137 |
| 2 m. - 4 m. ....   | -0,153                    | -0,27 | -0,287 | -0,37  | -0,263 | -0,213 | -0,03  |
| 4 m. - 6 m. ....   | +0,003                    | -0,17 | -0,2   | -0,27  | -0,223 | -0,113 | +0,05  |
| 6 m. - 8 m. ....   | +0,04                     | -0,10 | -0,147 | -0,24  | -0,13  | -0,033 | +0,07  |
| 8 m. - 10 m. ....  | +0,04                     | -0,07 | -0,05  | -0,1   | -0,07  | —      | —      |
| 10 m. - 12 m. .... | 0,0                       | -0,03 | —      | —      | —      | —      | —      |

Les vitesses sont données en mètres/secondes. Les colonnes en caractères gras sont celles où les vitesses indiquées sont de signe contraire en surface et en profondeur.

*Cas de crues.* — I. A la fin du mois d'octobre 1940, de fortes pluies se sont abattues sur tout le bassin versant de l'oued Bou-Regreg. Le débit fluvial s'accrut dans de très grandes proportions.

(1) Facteur important : le nombre de Reynolds (voir p. 181) qui varie constamment au cours de la marée.

J'ai pu mesurer en surface la vitesse du courant de jusant, à la station de la Tour Hassan, le 28 octobre, par une hauteur de marée de 3 m. 40 :

| Heures<br>après la<br>haute mer | Vitesses<br>en<br>m./sec. |
|---------------------------------|---------------------------|
| H.                              |                           |
| 0 30 .....                      | 0,25                      |
| 1 30 .....                      | 0,71                      |
| 2 30 .....                      | 1                         |
| 3 30 .....                      | 1                         |
| 4 30 .....                      | 1                         |
| 5 30 .....                      | 0,50                      |
| 6 30 .....                      | 0,25                      |

Pendant cette période de crues, il était très curieux de noter, qu'en surface, aucun courant de flot n'était perceptible en amont de la Tour Hassan. A la Tour Hassan même, le courant de flot ne se faisait sentir, en surface, que deux heures avant la haute mer. Comme, par ailleurs, le phénomène de marée persistait, c'est donc qu'en profondeur subsistait un courant de flot. Il est tout à fait regrettable que je n'aie pas eu de moulinet pour le mesurer, car il eût été intéressant de déterminer ce régime particulier de l'estuaire, où se superposaient un courant de profondeur se dirigeant vers l'amont (son existence ne peut être mise en doute par suite de variations de salinité que j'ai pu mesurer) et un courant de surface s'écoulant vers l'embouchure. Il est probable que la surface de discontinuité de vitesses qui sépare les deux courants doit entraîner la formation de tourbillons axés dans le plan de la surface qui amortissent rapidement les différences de vitesse.

II. Au mois de décembre 1938, j'ai pu faire des observations analogues dans l'estuaire de l'Aulne. Le courant de surface, très rapide en jusant, subsistait de longues heures après la basse mer, tandis qu'au fond se faisait sentir le courant de flot (Trégarvan); mais, en amont de Dinéault, on n'observait, à aucun moment, de courant de flot en surface. Bien que n'ayant pu exécuter, à cette époque, de mesures de salinité, je pense que, pendant tout le flot, il existait un courant de surface descendant l'estuaire d'amont en aval, tandis qu'au fond demeurait un courant de flot plus ou moins atténué, et totalement disparu à l'écluse de Guily-Glas.

VITESSES COMPARÉES DES COURANTS FLUVIAUX, MARINS ET D'ESTUAIRE. — La finesse, plus apparente que réelle, des sédiments déposés dans les estuaires a permis à certains auteurs de penser que c'était la très grande diminution de la vitesse du courant qui était responsable de cette sédimentation. On vient de le voir, dans les estuaires, les courants sont, tout au contraire, très violents et atteignent de grandes vitesses. Il ne m'a pas semblé inutile ici, à titre de simple comparaison et pour faire image, de rappeler les vitesses des courants fluviaux et marins.

La Seine ou d'autres fleuves navigables de plaine ont, en étiage, une vitesse de 0,20-0,30 m./sec., et ce n'est qu'en très grande crue qu'elle s'élève à 1,50-2 m/sec.

Mêmes valeurs pour les grosses eaux du Mississipi, Volga, Ohio... Le Rhône, à Valence, a une vitesse d'étiage de 1 m./sec. et de 1,50-2 m./sec. aux eaux moyennés.

On peut donc dire qu'à certains moments de la marée, la vitesse du flot ou du jusant est, dans les estuaires, comparable à celle des fleuves particulièrement rapides. Dans

tous les cas, les vitesses de l'eau dans les estuaires sont plus élevées que celles de l'eau dans la section située en amont de la zone de marée.

Les vitesses des courants de marée le long des côtes sont sous la dépendance des conditions topographiques sous-marines et côtières. Elles sont cependant en général plus faibles que dans les estuaires, où le courant est guidé et canalisé. En mer, les lignes de flux se développent beaucoup plus librement et la vitesse en est d'autant atténuée. Toutefois on a pu mesurer, par de grandes marées, des vitesses de l'ordre de 10 nœuds (5 m./sec.) dans le Fromveur, passage resserré entre les îles Molène et Ouessant. Cette vitesse, qui semble être un maximum pour des courants marins, n'est donc que double de celle que l'on observe beaucoup plus fréquemment dans les estuaires.

##### 5. — Evacuation du débit fluvial.

Etant donné que courant de flot et courant de jusant se font alternativement sentir dans l'estuaire, on peut se demander de quelle manière se trouve finalement évacuée l'eau fluviale. Si les vitesses de ces deux courants étaient égales et qu'ils durent le même temps, il n'y aurait pas de raison pour que l'eau amenée par le fleuve puisse être évacuée. L'eau douce s'accumulerait, ainsi, de plus en plus vers l'amont et, à chaque flot, la marée, en tant que phénomène dynamique, se propagerait toujours plus vers l'amont. Mais, de ce fait même, le volume d'eau emmagasiné augmenterait constamment et, en jusant, le débit de la rivière deviendrait plus fort et par conséquent la vitesse plus grande.

A un moment donné, cette vitesse serait telle que les eaux emmagasinées s'écouleraient vers la mer pendant le jusant et que le flot ne pourrait plus se faire sentir, tout au moins pendant un certain temps. Dans la réalité, les faits se passent bien un peu de cette manière. Pour avoir des idées nettes à ce sujet, il est nécessaire d'effectuer, dans l'estuaire, une grande quantité de mesures des vitesses du courant : en surface et aux différentes profondeurs, pendant tout le temps que durent flot et jusant, et en plusieurs stations sur une longitudinale : programme que je ne pouvais pas réaliser seul et sans moyens matériels. Je me suis donc servi des résultats obtenus sur la Tees. Toutes les mesures de courants sont groupées dans ce travail en tableaux où les vitesses, mesurées toutes les demi-heures, sont exprimées en pieds par seconde. De plus, ces tableaux de vitesse sont donnés pour 9 stations échelonnées sur 17 km. à partir de l'embouchure, et pour 4 coefficients de marée différents.

A partir de ces valeurs de la vitesse, j'ai calculé pour une hauteur de marée supérieure à 4 m. 70, la vitesse moyenne en m./sec., du flot et du jusant, en chaque station. D'autre part, j'ai noté le temps pendant lequel se fait sentir chacun de ces courants. Possédant ces deux données, il est facile de calculer la distance que parcourt théoriquement une particule d'eau pendant le flot, puis pendant le jusant. Ces distances, théoriquement parcourues, étant calculées, j'ai alors la distance résultante de déplacement de cette particule, soit vers l'amont (flot dominant), soit vers l'aval (jusant dominant).

Sur le dessin (fig. 16), j'ai porté, à partir du point d'observation, un vecteur proportionnel à cette distance résultante. Dans la réalité, les choses se compliquent; une particule ne sera pas animée de la même vitesse durant un même temps, car, si elle part d'une station d'observation donnée, avant de parcourir la distance indiquée par le vecteur, elle arrivera à la deuxième station où les vitesses seront différentes et ainsi de suite...

| Stations   | Surface            |                  |                      |                       |
|------------|--------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
|            | Vitesses moyennes  | Durées           | Distances parcourues | Distances résultantes |
|            |                    | H.               |                      |                       |
| O .....    | + 1,003<br>- 0,887 | + 5<br>- 7       | +18.054<br>-22.352   | - 4.298               |
| I .....    | + 0,673<br>- 0,825 | + 5 30<br>- 6 30 | +13.325<br>-19.305   | - 5.980               |
| II .....   | + 0,511<br>- 0,693 | + 5<br>- 7       | + 9.198<br>-17.463   | - 8.265               |
| III .....  | + 0,389<br>- 0,600 | + 4 30<br>- 7 30 | + 6.301<br>-16.200   | - 9.899               |
| IV .....   | + 0,330<br>- 0,600 | + 4 30<br>- 7 30 | + 5.346<br>-16.200   | -10.854               |
| V .....    | + 0,495<br>- 0,640 | + 5<br>- 7       | + 8.190<br>-16.128   | - 7.218               |
| VI .....   | + 0,306<br>- 0,708 | + 5<br>- 7       | + 5.508<br>-17.841   | -12.333               |
| VII .....  | + 0,627<br>- 0,907 | + 5<br>- 7       | +11.286<br>-22.856   | -11.570               |
| VIII ..... | + 0,496<br>- 0,643 | + 4 30<br>- 7 30 | + 8.035<br>-17.361   | - 9.326               |

| Stations   | Fond               |                  |                      |                       |
|------------|--------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
|            | Vitesses moyennes  | Durées           | Distances parcourues | Distances résultantes |
|            |                    | H.               |                      |                       |
| O .....    | + 0,722<br>- 0,617 | + 6<br>- 6       | +15.610<br>-13.329   | + 2.281               |
| I .....    | + 0,587<br>- 0,376 | + 7<br>- 5       | +14.802<br>- 6.771   | + 8,031               |
| II .....   | + 0,349<br>- 0,221 | + 7<br>- 5       | + 8.814<br>- 3.979   | + 4.835               |
| III .....  | + 0,346<br>- 0,155 | + 6 30<br>- 5 30 | + 8.108<br>- 3.070   | + 5.038               |
| IV .....   | + 0,277<br>- 0,151 | + 6 30<br>- 5 30 | + 6.486<br>- 3.005   | + 3.481               |
| V .....    | + 0,372<br>- 0,419 | + 6 30<br>- 5 30 | + 8.065<br>- 8.298   | - 0.233               |
| VI .....   | + 0,478<br>- 0,386 | + 6 30<br>- 5 30 | +11.196<br>- 7.744   | + 3.452               |
| VII .....  | + 0,643<br>- 0,443 | + 5<br>- 7       | +11.583<br>-11.226   | + 0.357               |
| VIII ..... | + 0,442<br>- 0,323 | + 5<br>- 7       | + 7.959<br>- 8.149   | - 0.190               |

Dans ces tableaux, les vitesses moyennes sont exprimées en mètres par seconde, les distances en mètres. Le signe (+) signifie flot, et le signe (-), jusant.

C'est pourquoi, par une flèche plus épaisse, j'ai indiqué la distance résultante moyenne que parcourerait une particule d'eau pendant tout un flot et tout un jusant.

L'examen du tableau permet de noter que : 1° en surface, la durée du jusant est constamment plus grande que celle du flot; 2° au fond, la durée du flot, jusqu'en la station VI, est plus grande que celle du jusant; en amont de la station VI, le jusant dure plus longtemps que le flot.

Celui du graphique des vitesses moyennes permet de noter : 1° que les vitesses moyennes de surface sont plus élevées que celles du fond; 2° qu'en surface, le jusant est plus rapide que le flot; 3° qu'au fond, le flot est plus rapide que le jusant.

Enfin, le schéma figure ces règles et permet, de plus, de constater que le mouvement général résultant de l'eau est dirigé vers l'embouchure (prépondérance du jusant en temps et en vitesse), à la surface; et qu'au fond, tout au moins jusqu'à la station VII, l'eau circule en sens inverse.

La distance résultante dont progresse une particule d'eau au cours d'une marée (flot et jusant), en surface, est égale à 8.860 m. La longueur de l'estuaire dans la section considérée est de 17 km. On voit donc que l'eau, qui se trouve à 17 km. de l'embouchure, mettra deux marées entières (24 heures) pour atteindre l'embouchure et être évacuée en mer. L'eau douce fluviale qui circule en surface (ce fait sera précisé dans un prochain chapitre) atteint donc la mer assez rapidement.

Mais, par contre, au fond, l'eau progresse finalement vers l'amont. Pourtant, il est

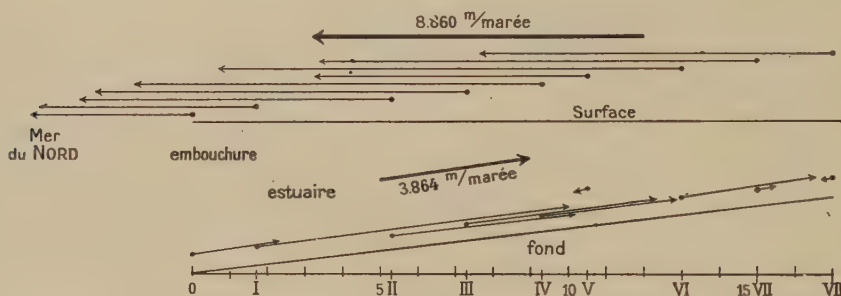


FIG. 16. — Estuaire de la Tees. Distances résultantes parcourues par des particules au cours d'une marée (flot + jusant) en différents points de l'estuaire.

bien entendu qu'il faut que cette eau de fond salée (eau de mer), et donc dense, soit évacuée à mesure. Par suite de phénomènes tourbillonnaires, d'une part, et de phénomènes de diffusion, d'autre part, cette eau se dessale progressivement vers l'amont, cédant une partie de ses sels aux eaux de surface.

Comme on le voit sur le schéma, à partir de la station VIII, cette progression vers l'amont s'annule, et il est dès lors légitime de penser que cette eau est reprise par la circulation de surface. Il semble donc exister dans cet estuaire une circulation cyclique de l'eau.

Les couches d'eau intermédiaires, comprises entre la surface et le fond, sont soumises, avec une intensité décroissante, aux mêmes règles. Il existe vraisemblablement une couche d'échange ou de discontinuité, où les particules ne subissent aucun transport résultant. La profondeur à laquelle existe cette couche singulière dépend de toute évidence de la valeur du débit fluvial et de celle du coefficient de marée, et varie avec l'heure de la marée.

Ces résultats, acquis grâce aux mesures effectuées sur la Tees, par hauteur de marée de 4 m. 70, sont encore vrais lorsque celle-ci est moindre et quand le débit fluvial augmente. Mais les vitesses changent les distances parcourues aussi, et finalement le point en amont jusqu'où se fait sentir une progression résultante dirigée d'aval en amont. Mais le schéma reste valable.

Je ne possède pas de données aussi nombreuses et aussi précises pour d'autres

estuaires, mais l'analogie de tous les phénomènes hydrodynamiques et physicochimiques qui ont lieu dans l'estuaire de la Tees, avec ceux des estuaires bretons ou du Bou-Regreg, me permettent de croire que la circulation de l'eau en général, et l'évacuation de l'eau douce en particulier, doivent avoir lieu par des processus identiques.

Il est inutile, je pense, d'insister sur l'importance de cette double circulation, qui va être très grande lorsqu'il s'agira d'étudier les phénomènes de transport, tant des matériaux en suspension dans l'eau que de ceux qui sont roulés sur le fond.

#### 6. — Tourbillons et turbulence.

Régime laminaire et régime turbulent constituent des expressions courantes dans le langage des hydrodynamiciens. Le régime laminaire est celui d'un liquide s'écoulant en filets parallèles (en admettant à la base l'existence de ces derniers). Il a lieu lorsque cet écoulement se fait dans des conditions très particulières : parois parallèles et lisses du canal d'écoulement, un vecteur vitesse sans composante normale et un nombre de Reynolds inférieur à un certain critérium. Le nombre de Reynolds :  $R = \frac{VI}{\gamma}$  (où  $V$  = vitesse,  $l$  = rapport de la surface d'une section au périmètre mouillé,  $\gamma$  = viscosité du liquide), apparaît comme un nombre sans dimensions.

Le régime laminaire est facilement réalisé dans des expériences de laboratoire; mais, dans la nature, il est extrêmement rare et c'est à peine si l'écoulement est laminaire dans certains canaux de navigation (vitesses très faibles et parois lisses et parallèles).

Dans la nature, fleuves, rivières et, à plus fortes raisons, estuaires, ont un régime turbulent qu'il est beaucoup plus difficile de définir. Sans faire intervenir d'hypothèses sur sa structure complexe, on pourrait le définir comme étant un régime non laminaire.

Dans un estuaire, un certain nombre de conditions sont réunies pour que le régime turbulent se manifeste : 1° parois (rives) non parallèles, irrégulières, méandres; 2° lit irrégulier (fosses, seuils); 3° rugosités des parois (à petite échelle); 4° courants s'écoulant à certains moments de la marée en directions opposées au fond et en surface; 5° variation de la masse spécifique et de la viscosité du liquide d'une couche à l'autre.

La turbulence du courant est plus ou moins élevée suivant l'intervention des facteurs qui la déterminent : ainsi, dans un estuaire, les vitesses varient entre une haute mer et une basse mer pour s'annuler aux étales (qui peuvent correspondre aux heures de hautes et de basses mers). A basse mer, on peut, dans certaines sections où les parois sont constituées par une slikke à pente très raide, les considérer comme lisses et parallèles, etc... Le régime turbulent peut être momentanément très faible.

La turbulence est souvent considérée comme étant due à l'extension et à la déformation, dans l'espace, de tourbillons. Un tourbillon est généralement net en son centre, puis il dégénère à la périphérie. La dégénérescence de toute une série de tourbillons crée une zone marginale turbulente.

Une grande variété de tourbillons a été décrite : tourbillons à axe horizontal, tourbillons à axe vertical, tourbillons fixes, tourbillons mobiles, etc... Il ne peut être question ici d'aborder une étude approfondie des manifestations tourbillonnaires dans les estuaires, qui dépasserait nos possibilités et le cadre de ce travail. Mais il est cependant nécessaire d'insister sur l'existence de tourbillons et d'un régime turbulent dans les estuaires, tant

en flot qu'en jusant. Ils interviennent en effet dans le mécanisme de transport et de sédimentation des particules en suspension dans l'eau et dans le mélange des eaux douces et salées.

LOUIS GLANGEAUD (1938) a décrit, dans l'estuaire de la Gironde, les phénomènes dus à la turbulence et aux tourbillons. Il a essentiellement pris comme modèle le beau travail de HJULSTRÖM (1935) sur la rivière suédoise Fyris.

J'ai pu observer de mon côté, dans les estuaires que j'ai étudiés, plusieurs manifestations du régime turbulent. C'est ainsi que, le long des rives en particulier (fig. 17), s'établissent, surtout aux moments des vitesses maxima du courant, des tourbillons à axe vertical : ils sont d'une netteté remarquable et très souvent matérialisés grâce aux brindilles, feuilles, bouchons, etc..., en flottaison. Ce ne sont pas des tourbillons fixes, car les objets flottés subissent un net transport.

Quand les parois sont particulièrement rugueuses et quand l'estuaire décrit des méandres, il arrive que ces tourbillons progressent en sens inverse du courant domi-

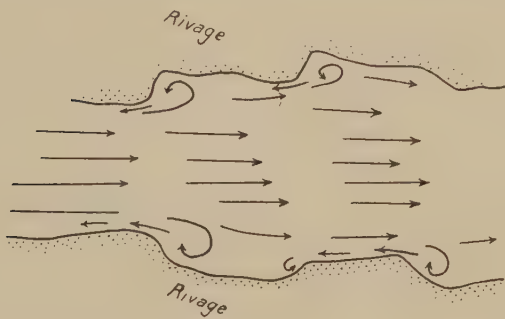


FIG. 17.

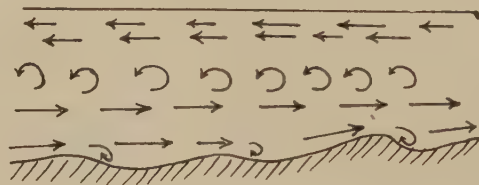


FIG. 18.

FIG. 17 et 18. — Tourbillons schématiques et contre-courants pouvant prendre naissance dans un estuaire.

nant : il s'établit ainsi des contre-courants. Ces derniers sont bien connus de tous les pêcheurs riverains qui les utilisent pour progresser, en embarcation, dans la direction opposée à celle du courant principal (flot ou jusant). C'est dans l'estuaire de l'Aulne que j'ai observé les plus nets contre-courants : une embarcation pouvait, en certains points de l'estuaire, progresser dans la direction opposée au courant dominant sans moyen de propulsion.

Un moyen commode pour se rendre compte du sens d'un courant consiste à remarquer, lorsqu'une embarcation est à l'ancre, l'orientation de son avant : le courant s'écoule toujours de l'avant à l'arrière du canot qui tire sur sa chaîne.

Toujours est-il que, sans aller chaque fois jusqu'à réaliser des contre-courants, le freinage et les mouvements tourbillonnaires conséquents sont tels, dans les estuaires, que l'on observe toujours des courants riverains, sinon opposés au courant dominant, tout au moins ayant une vitesse ralentie ou nulle. Ces faits sont importants à noter, car le long des rives, les salinités, par exemple, sont en général en retard sur celles du milieu de l'estuaire, et ils peuvent seuls, expliquer ces anomalies.

Au milieu de l'estuaire, il est, par contre, facile à un observateur attentif de remarquer des tourbillons à axe horizontal, perpendiculaire à la direction du courant, qui

passent devant lui comme des rouleaux. L'eau qui s'écoule apparaît ainsi tantôt chargée d'un nuage de matières en suspension, tantôt beaucoup plus limpide. On pourrait expliquer ces phénomènes par le terme de pulsations. GLANGEAUD estime avec juste raison, semble-t-il, que la variation dans la teneur en suspension est due aux échanges tourbillonnaires. Il prête à ces tourbillons la faculté, tantôt d'éroder (teneur élevée en suspension), tantôt de déposer (teneur faible en suspension); les échanges se feraient dans le sens vertical de haut en bas et de bas en haut, depuis la surface jusqu'au fond.

Je ne crois pas, pour ma part, que l'existence de tourbillons à axes horizontaux puissent être niés, mais il me semble très difficile que, dans un estuaire où les eaux sont très différentes, souvent d'une couche à l'autre (densité, température), il y ait un échange continu du fond à la surface sur une hauteur de plusieurs mètres.

Il est évident que, de même que le freinage du courant sur les bords détermine des tourbillons riverains, de même le freinage de ce courant par les aspérités du lit, a pour conséquence la création de tourbillons à axe horizontal qui peuvent, dans une certaine mesure (qui dépend de la nature du fond), avoir un pouvoir érosif et donc faire augmenter la teneur en suspensions.

De même, ainsi qu'on l'a vu, à certaines heures (principalement au début et à la fin du flot), le courant de fond et le courant de surface sont dirigés en sens inverse; au contact de ces deux couches s'établissent nécessairement des tourbillons qui doivent déterminer une couche critique, d'épaisseur variable avec le moment de la marée (variations de vitesses) (fig. 18).

Enfin, même lorsque le flot ou le jusant se sont établis d'une manière totale sur toute l'épaisseur d'eau, par suite des différences de densité (surtout importantes en hiver) et des forces de frottement, les couches sont animées d'une vitesse qui diminue avec la profondeur : il en résulte, encore une fois, la création de tourbillons.

Ainsi s'échelonnent, du fond vers la surface, sur une verticale, toute une série de zones tourbillonnaires, dont les tourbillons constituants ont bien un axe horizontal et perpendiculaire à la direction du courant (ou des courants).

Il existe, selon GLANGEAUD, dans l'estuaire de la Gironde, des tourbillons à axe horizontal, mais dirigés dans le sens du courant; ces derniers expliqueraient la formation de bancs médians dans les chenaux. L'existence de ces tourbillons, dans les estuaires, est beaucoup moins facile à déceler.

Enfin, on peut se demander si, dans certaines conditions, des tourbillons thermo-convectifs ne pourraient pas s'établir.

Une étude très poussée de la turbulence s'impose si l'on veut saisir entièrement la complexité du régime hydrodynamique des estuaires.

## CHAPITRE II. — LA TEMPÉRATURE

Dans un estuaire, deux sortes d'eau se mélangent, ou du moins entrent en contact. Il est donc normal de penser que la température n'est pas constante en tous les points du volume d'eau emmagasiné dans l'estuaire : *en été*, en règle générale, le continent est plus chaud que l'océan : il semblerait donc que les eaux fluviales doivent être plus chaudes

que les eaux marines; — *en hiver*, c'est le phénomène inverse qui a lieu : la conséquence doit être aussi inverse.

Vérifie-t-on, dans la réalité, ces deux règles ? Quelques résultats obtenus à diverses époques de l'année, vont répondre à cette question.

### 1. — Régime des températures en hiver.

#### I. — ESTUAIRE DE L'AULNE

|                                                                                                       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 30 décembre 1938. Température de l'eau de mer ( $S = 31\text{‰}$ ), en aval de Landévenec (fond)..... | 8°5   |
| 29 décembre 1938. Température de l'eau douce, écluse de Guly-Glas (surface).....                      | 5°9   |
| (fond : 3 m.).....                                                                                    | 6°2   |
| Différence de température entre l'eau douce et l'eau de mer .....                                     | + 2°5 |

#### II. — ESTUAIRE DE LA PENZÉ

|                                                                                                    |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 29 décembre 1939. Température de l'eau de mer ( $S = 35\text{‰}$ ), à Penzornou (fond : 6 m.)..... | 8°4   |
| 30 décembre 1939. Température de l'eau douce au village de Penzé.....                              | 4°1   |
| Différence de température entre l'eau douce et l'eau de mer.....                                   | + 4°3 |

#### III. — ESTUAIRE DE LA TEES (*Survey of the Tees*, 1931-1935).

|                                                                                          |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Novembre-décembre 1931 (moyennes). Température de l'eau de mer ( $S = 27\text{‰}$ )..... | 8°    |
| Novembre-décembre 1931 (moyennes). Température de l'eau douce.....                       | 4°5   |
| Différence de température entre l'eau douce et l'eau de mer.....                         | + 3°5 |

D'après ce tableau, il apparaît nettement qu'en hiver, l'eau douce fluviale est plus froide de quelques degrés que l'eau de mer (Tees, Aulne, Penzé, sont dans une même zone géographique des régions tempérées).

Les eaux fluvio-marines ont des températures qui reflètent l'origine des deux sortes d'eau qui entrent en contact.

J'ai mesuré les températures des eaux (en surface et en profondeur) en plusieurs

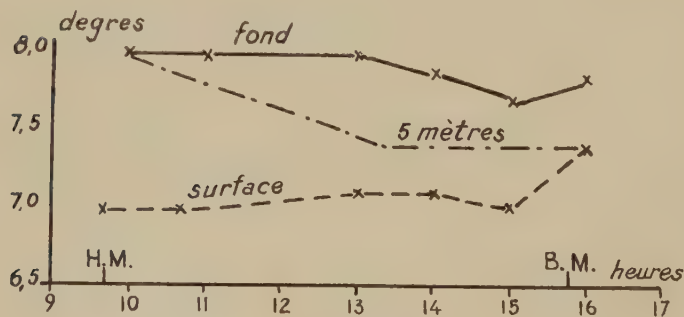


FIG. 19.  
Estuaire de l'Aulne.  
Variations de la température  
à Trégarvan (28-xii-1938),  
au cours d'une marée.

points d'un estuaire. La température de ces eaux varie avec l'heure de la marée, c'est-à-dire avec la proportion plus ou moins grande d'eau de mer ou d'eau douce au point d'observation. Les graphiques qui suivent illustrent ces faits.

1. VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE AU COUDE DE TRÉGARVAN (AULNE), 28 DÉCEMBRE 1938 (fig. 19). — A haute mer, l'eau du fond ( $> 7\text{ m.}$ ) salinité de  $30\text{‰}$  possède une température de  $8^{\circ}$ , tandis qu'en surface (salinité de  $4,5\text{‰}$ ), elle n'est que de  $7^{\circ}$ . On remarquera qu'à mesure que la mer baisse, la température de l'eau du fond, qui reste d'abord constante, diminue ensuite brusque-

ment pour atteindre, un peu avant la basse mer, la température minimum de  $7^{\circ}7$  (la salinité est alors de 26 ‰).

En surface, la température, au lieu de décroître, augmente jusqu'à 14 heures, ce qui peut paraître anormal, étant donné qu'il y a apport d'eau douce. Mais, ici, il faut faire intervenir un facteur dont il n'a pas encore été question: la température de l'air. Elle augmente avec la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon (maximum vers 14 heures). Cette influence est nette sur les eaux de surface, mais ne se fait naturellement pas sentir sur les eaux de profondeur. Le maximum de  $7^{\circ}2$  atteint, une baisse brusque, en rapport avec la diminution de salinité (1 ‰), ramène l'eau de surface à une température de  $7^{\circ}$ . On remarquera aussi que l'amplitude de la variation de température est faible pour les eaux de profondeur ( $0^{\circ}3$ ), celle de la salinité étant également faible (3,10‰).

Par contre, si l'on examine la variation de température de l'eau de la couche de 5 m. (comptés à partir de la surface), elle est de  $0^{\circ}6$ , ce qui s'explique par une variation de salinité de cette même couche de plus de 22 ‰. Les températures, comme on le voit, ne varient pas dans un rapport aussi large que les salinités.

2. VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE AU VILLAGE DE PENZÉ (PENZÉ), 30 DÉCEMBRE 1939 (fig. 21). — Comme on a pu le voir dans le précédent chapitre, la marée ne se fait sentir qu'un très petit nombre d'heures au village de Penzé. Le flot arrive brusquement et, avec lui, la salinité, qui était à peu près nulle (0,3 ‰) jusqu'alors, prend subitement des valeurs élevées (29 ‰). Tant que le courant fluvial prédomine, c'est-à-dire durant tout le jasant et une partie du flot théorique (du point de vue horaire), l'eau douce fluviale coule seule avec un débit insignifiant (hauteur d'eau de 60 cm. environ).

La température des eaux, en hiver, reflète cette situation assez particulière: les eaux douces ont une température de  $4^{\circ}1$  à  $4^{\circ}2$  et, brusquement, à l'heure suivante, la température des eaux du fond (le niveau de l'eau a monté avec le flot et atteint 2 m. 50), passe à  $5^{\circ}5$  et atteint  $5^{\circ}7$  à haute mer (la salinité est alors de 20 ‰).

En surface, l'augmentation de température est moindre; de  $4^{\circ}2$ , elle passe à  $4^{\circ}5$  (salinité: 12 ‰). L'influence des variations de la température de l'air est difficilement appréciable: en effet, la température de l'air diminue à mesure que celle de l'eau augmente. Son influence, même pour les eaux de surface, est dominée par celle de la marée.

3. VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE PAR LE TRAVERS DE LA POINTE DE PENZORNOU (PENZÉ), 29 DÉCEMBRE 1939 (fig. 20). — La pointe de Penzornou, située à l'entrée de l'estuaire proprement dit, est une station d'observation où l'eau douce ne parvient jamais. Cependant à basse mer, avec des salinités faibles (21 ‰ en surface), la température est de  $7^{\circ}2$  et elle augmente régulièrement

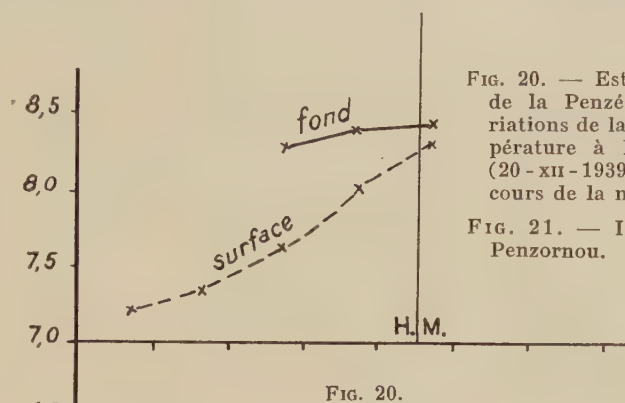


FIG. 20. — Estuaire de la Penzé. Variations de la température à Penzé (20 - XII - 1939) au cours de la marée.

FIG. 21. — Id., à Penzornou.

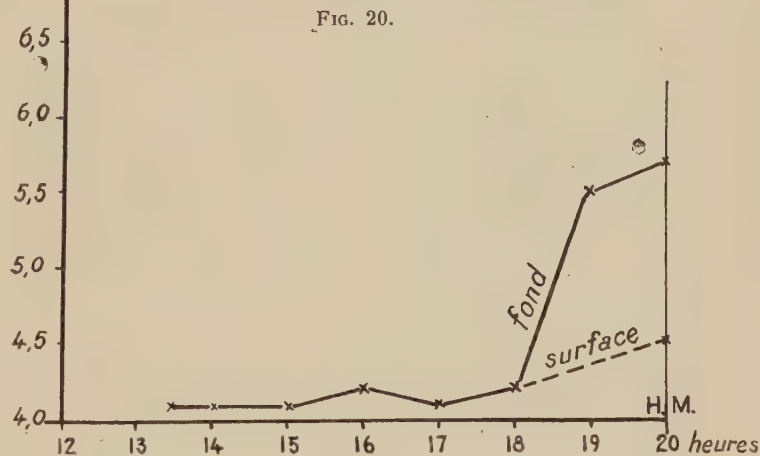


FIG. 21.

avec l'arrivée d'une plus grande proportion d'eau marine pour finalement atteindre 8°3 à haute mer en surface (salinité : 35 ‰).

En profondeur, la salinité varie beaucoup moins (de 31 ‰, elle passe à une valeur 35 ‰) et il est probable que la température demeure assez constante. En tout cas, les seules mesures faites dans les dernières heures de flot indiquent des températures plus élevées que celles des eaux de surface.

On peut donc conclure qu'en hiver, aux latitudes moyennes (48° N.), les eaux marines sont toujours plus chaudes que les eaux douces; dans les estuaires, les variations de température de l'eau suivent les variations des eaux des deux origines.

INFLUENCE DES EAUX FLUVIALES SUR LA TEMPÉRATURE DES EAUX LITTORALES MAROCAINES, EN HIVER. — J'ai pu effectuer, à bord du « Chasseur 2 », des mesures de températures des eaux littorales marocaines, aux embouchures des oueds Sebou, Bou-Regreg et Oum er Rbia, au mois de janvier 1941. L'influence fluviale est très nette, du moins sur les eaux de surface, les seules dont j'ai mesuré la température :

| Stations            | Oued Sebou |        |       |           | Oued Bou-Regreg     |        |       |           | Oued Oum er Rbia   |        |           |
|---------------------|------------|--------|-------|-----------|---------------------|--------|-------|-----------|--------------------|--------|-----------|
|                     | Heures     | Salin. | Temp. | Temp. air | Heures              | Salin. | Temp. | Temp. air | Heures             | Salin. | Temp. air |
| 1.....              | 8 30       | 34,71  | 15°1' | 9°        | 16 40               | 32,49  | 14°8  | 14°5      | 10                 | 37,49  | 14°2      |
| 2.....              | 8 55       | 20,56  | 12°3  | —         | 16 50               | 23,26  | 13°1  | —         | 10 20              | 35,82  | 14°7      |
| 3.....              | 9          | 13,9   | 11°5  | —         | 16 55               | 22,23  | 12°8  | —         | 10 45              | 36,1   | 14°4      |
| 4.....              | 9 10       | 28,18  | 13°3  | 9°        | 17                  | 29,44  | 14°1  | —         | 11                 | 34,16  | 14°2      |
| 5.....              | 9 30       | 32,9   | 14°1  | —         | 17 05               | 36,10  | 15°   | —         | 11 15              | 36,45  | 14°3      |
| 6.....              | 9 40       | 34,56  | 14°2  | —         | 17 15               | 36,38  | —     | —         | 11 35              | 36,1   | 14°9      |
| 7.....              | 10 15      | 33,88  | 14°4  | —         | 17 30               | 35,55  | 15°5  | —         | 12                 | 36,51  | 15°       |
| 8.....              | 10 40      | 32,77  | 14°4  | —         | 17 40               | 34,71  | 14°   | —         | 12 45              | 36,78  | 15°       |
| 9.....              | 10 45      | 37,49  | 15°6  | —         | 17 45               | 31,66  | 13°5  | —         | 13 25              | 35,27  | 15°       |
| 10.....             | 13 45      | 29,2   | 14°6  | 13°8      | —                   | —      | —     | —         | 13 45              | 29,16  | 14°2      |
| 11.....             | 14 15      | 36,1   | 15°6  | —         | —                   | —      | —     | —         | 14                 | 26,94  | 19°8      |
| 12.....             | 14 45      | 34,99  | 15°9  | —         | —                   | —      | —     | —         | 14 05              | 26,67  | 13°8      |
| 13.....             | 15         | 22,5   | 12°9  | 13°       | —                   | —      | —     | —         | 14 35              | 35,4   | 14°9      |
| 14.....             | 15 30      | 11,01  | 12°6  | —         | —                   | —      | —     | —         | 15 45              | 36,23  | 15°8      |
| H. M. à 10 h. 40 m. |            |        |       |           | H. M. à 10 h. 40 m. |        |       |           | H. M. à 10 heures. |        |           |

Quelques remarques d'après ce tableau :

1° *Oued Oum er Rbia* (fig. 22). — Au début du jusant, à mesure qu'on approche de l'embouchure, la température diminue : St. 2 : 14°7; St. 3 : 14°4; St. 4 : 14°2.

Un peu plus tard, à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure, la température augmente : St. 5 : 14°3; St. 6 : 14°9; St. 7 : 15°; S. 8 : 15°.

En fin de jusant ce phénomène est encore plus net : St. 11 et 12 : 13°8; St. 13 : 14°9; St. 14 : 15°8.

La température des eaux littorales de surface, en face de l'embouchure de l'Oum er Rbia, est donc soumise à l'influence des eaux fluviales qui est normalement maximum en fin de jusant.

2° *Oued Bou-Regreg* (fig. 23). — A mesure que l'on s'approche de l'embouchure, et de quelque azimuth que l'on vienne, on constate une diminution de température en relation avec la diminution de salinité. En même temps que ces mesures permettent de jalonner l'influence fluviale, elles permettent de repérer le sens du courant littoral qui est nettement, dans ce cas (fin de jusant), dirigé vers le SW. Ce courant dirigé SW. est à noter, car on a l'habitude de croire, localement, que le courant est dirigé vers le Nord. Cela doit d'ailleurs être vrai à certains moments de la marée (flot ?), car on retrouve cadavres et épaves provenant de la côte au Sud de Rabat, rejetés sur la côte au Nord de Salé.

3° Oued Sebou (fig. 24). — Mêmes observations que pour les deux autres embouchures. A mesure qu'on approche des jetées, la température passe de 15°1 à la St. 1, à 12°3 à la St. 2, et à 11°5 à la St. 3. Le courant littoral semble porter ici vers le N.-NW. La limite entre les eaux à température marine et celles influencées par les eaux douces est nette dans cette direction : à la St. 8 : 14°4, et la St. 9, voisine de 1.000 m. : 15°6.

Il apparaît donc nettement qu'en hiver (fort débit fluvial), la température des eaux littorales de surface, aux embouchures des fleuves marocains, subit une diminution en rapport avec l'apport d'eau douce, diminution maximum en fin de jusant.

## 2. — Régime des températures en été.

### I. — ESTUAIRE DE L'AULNE

Septembre 1938.

Pont-Launay :

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| 1° Eau douce (S. = 2‰) en surface..    | 17°3 |
| Eau (S. = 8‰) à 3 m. 20 ..             | 18°2 |
| 2° Eau (S. = 3‰) en surface .....      | 18°  |
| Eau (S. = 8,5‰) à 3. m. 40.....        | 18°9 |
| Landévenec : Eau de mer (S. = 35‰) ... | 16°5 |
| Trégarvan : Eau de mer (S. = 28‰) .... | 16°5 |
| (S. = 35‰) .....                       | 17°  |
| Dinéault : Eau de mer (S. = 33‰) ....  | 17°2 |

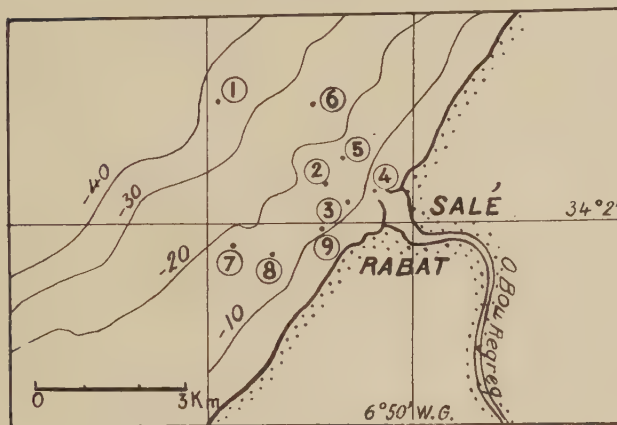


FIG. 23.

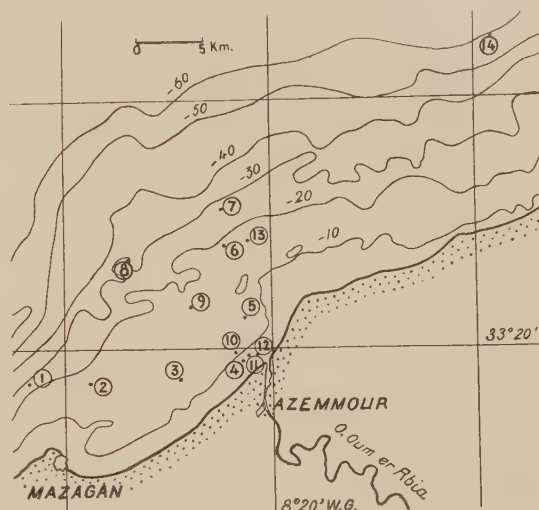


FIG. 22.

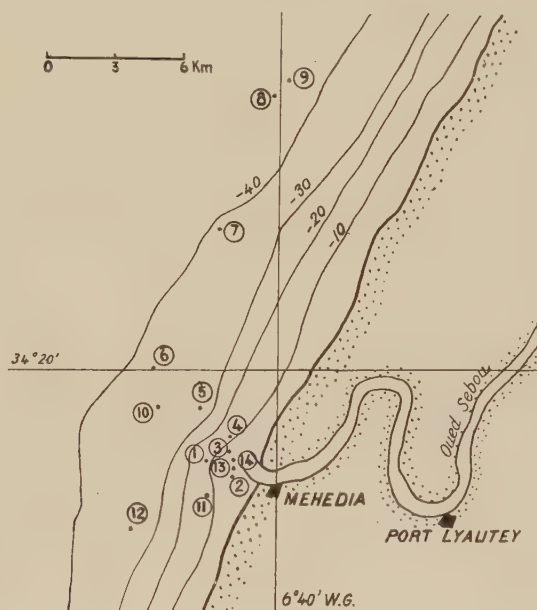


FIG. 24.

FIG. 22, 23, 24. — Cartes bathymétriques et points de prélèvement d'échantillons aux embouchures (en mer) des estuaires de l'Oum er Rbia, Bou-Regreg et Oued Sebou.

Ces mesures de température n'ont pas été effectuées le même jour aux quatre stations ici indiquées. Le temps, pendant ces quelques jours, est demeuré sensiblement le même. Il ne ressort pas de conclusion nette de ces mesures de température, sinon, toutefois, que l'eau de mer semble avoir une température moyenne aux environs de 17°, tandis que l'eau, beaucoup moins salée, en amont de l'écluse de Guily-Glas, à Port-Launay, a une température plus élevée. Mais je

ne considère pas comme probantes à ce sujet, ces mesures de Port-Launay. En effet, ce sont des eaux qui sont demeurées calmes et sans écoulement entre Châteaulin et l'écluse, car celle-ci est fermée durant la plus grande partie du flot et du jusant (elle n'est ouverte qu'en fin de flot et au début du jusant pour livrer passage aux quelques bateaux sabliers); on peut donc penser que l'air ambiant les a réchauffées.

Selon des résultats publiés par J. ROUCH (1942), la température de l'eau de mer, le 8 septembre 1938, en rade de Camaret, atteignait une valeur moyenne de 15°6, et, le 8 août de la même année, de 17°4 à la Pointe du Grand-Minou, en rade de Brest, tandis que, le 6 août, elle était de 20°1 à Landévenec.

Il y a donc lieu de conclure que les eaux douces ou saumâtres ont une température plus élevée que celle de l'eau de mer à la même époque.

## II. — ESTUAIRE DE LA PENZÉ

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| 11 août 1939. Roch'Illievec : eau de mer (S. = 35 ‰)..... | 17° |
| 21 septembre 1941. Village de Penzé : eau douce.....      | 14° |
| Affluent Kerlaudi : eau douce.....                        | 15° |
| Pont de la Corde : eau de mer (S. = 35 ‰).....            | 17° |

Il semblerait, d'après ces résultats, que l'eau de mer, en été, soit plus chaude que l'eau douce fluviale. Sans doute est-ce là une conclusion qui surprend, mais elle doit être localisée dans le temps, à cet été particulièrement froid de 1941 et dans l'espace, à la rivière de Penzé, qui est très petite et dont les eaux tombées sur le Bassin versant, n'ont guère le temps de se réchauffer avant d'arriver à la mer. En tout cas, les résultats sont inverses de ceux de l'Aulne, à la même époque.

## III. — ESTUAIRE DE LA TEES (*Survey of the Tees*, 1931-1935).

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| Août 1930 (moyennes). Eau de mer (S. = 27 ‰)..... | 14° |
| Eau douce .....                                   | 16° |
| Août 1931 (moyennes). Eau de mer (S. = 27 ‰)..... | 15° |
| Eau douce .....                                   | 12° |

Les écarts de température observés sont donc inverses entre le mois d'août 1930 et celui de 1931.

REMARQUES. — Les résultats obtenus dans ces trois estuaires montrent qu'en été il n'y a pas de règle générale, car suivant l'année, la superficie et la constitution du bassin versant, les eaux douces sont tantôt plus chaudes, tantôt plus froides que les eaux marines qui, par contre, ont une température beaucoup plus constante.

Il est par ailleurs intéressant de noter que les eaux d'estuaire ont en général, en été, une température toujours plus élevée que les eaux douces et les eaux marines.

|                                            | Températures<br>de l'eau douce | Températures<br>de l'eau de mer | Températures<br>de l'eau saumâtre<br>(S. = 20 ‰) |
|--------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| Estuaire de l'Aulne, septembre 1938.....   | 17° (?)                        | 16°5                            | 17°                                              |
| Estuaire de la Penzé, septembre 1941 ..... | 15°                            | 17°                             | 18° - 19°                                        |
| Estuaire de la Tees, août 1931.....        | 12°                            | 15°                             | 17°                                              |

On s'explique facilement cette anomalie apparente si l'on songe qu'une grande partie du volume d'eau, emmagasinée dans l'estuaire, n'a pas le temps d'atteindre la mer

durant le jusant et qu'elle se trouve refoulée avec le flot. Ainsi, les eaux subissent plus facilement le réchauffement diurne, notamment les jours où l'insolation est forte.

1. VARIATIONS DE TEMPÉRATURE AU COUDE DE TRÉGARVAN (AULNE), 7 SEPTEMBRE 1938 (fig. 25). — En surface, la température minimum s'observe une heure (à midi) après la basse mer : 16°5, correspondant à un minimum de salinité (28 ‰). A partir de ce moment, la température s'élève pour atteindre (à 14 heures) 17°, trois heures avant la haute mer. Ensuite, il y a diminution de température, alors que la salinité continue à croître jusqu'à l'heure de haute mer.

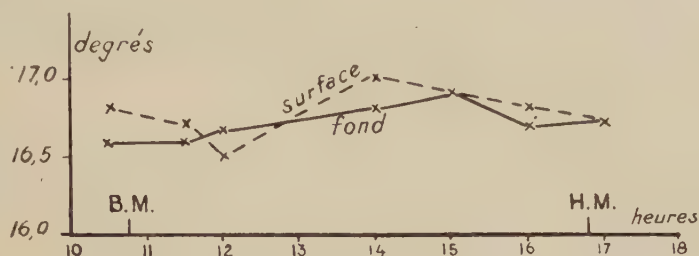


FIG. 25.

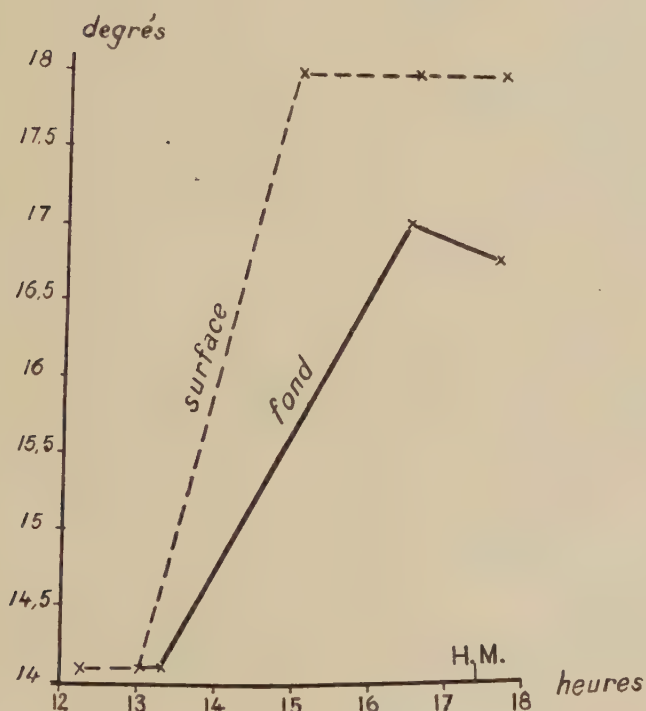


FIG. 27.

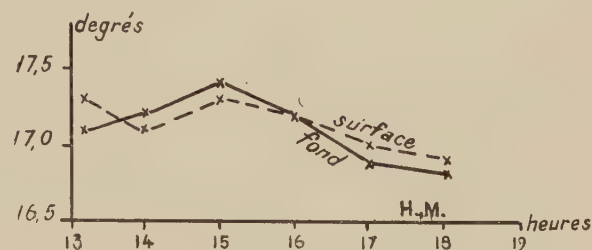


FIG. 26.

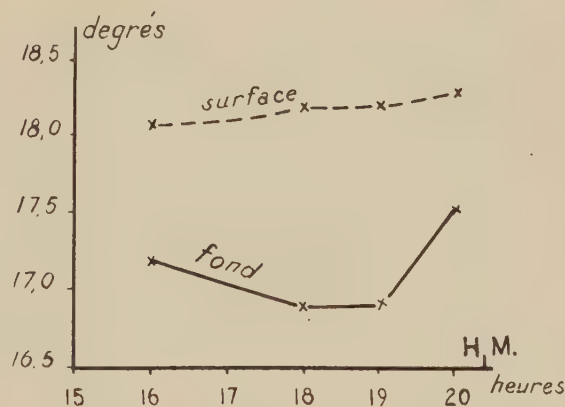


FIG. 28.

FIG. 25. — Variations de température à Trégarvan (7-ix-1938) (estuaire de l'Aulne) au cours de la marée.

FIG. 26. — Id. (8-ix-1938), à Dinéault (Aulne).

FIG. 27. — Id. (21-ix-1939), à Penzé (estuaire de la Penzé).

FIG. 28. — Id. (11-viii-1939), à Penzornou (Penzé).

Il semble donc que, dans ce cas, la température de l'eau, en surface, subit l'influence nette de la température de l'air qui est maximum, on le sait, vers 14 heures. La diminution de température, après 14 heures, peut, par contre, être due à la fois aux deux facteurs : augmentation du pourcentage d'eau de mer et diminution de la température de l'air.

Au fond, la variation de température est moins grande (la salinité est pourtant presque toujours la même qu'en surface), et les remarques qui viennent d'être faites peuvent, dans l'ensemble, être renouvelées.

2 km. en amont de Trégarvan, au bac de Dinéault (8 septembre 1938) (fig. 26), j'ai effectué des mesures de température. La température varie à peu près de la même manière qu'à Trégarvan. Les courbes de température des eaux de surface et du fond ont la même allure : maximum à 15 heures (mi-marée), et minimum à haute mer, à 18 heures.

2. VARIATIONS DE TEMPÉRATURE AU VILLAGE DE PENZÉ (PENZÉ), LE 21 SEPTEMBRE 1941 (fig. 27). — Comme en hiver, les variations de température sont brusques, et sous la dépendance complète, non pas directement de la température de l'air, mais de l'arrivée des eaux saumâtres emmagasinées dans l'estuaire.

Les eaux douces, comme on l'a vu, ont une température de 14°, tant que le débit fluvial n'est pas arrêté par le courant de flot. Dès que celui-ci se fait sentir, des eaux à peine salées (0,86 ‰), mais ayant séjourné dans l'estuaire un peu plus en aval et ayant été réchauffées par l'air ambiant (température air : 22°), sont refoulées en amont : la température passe ainsi brusquement de 14° à 18°. Jusqu'à la fin du flot, la température demeure à 18°. Dès que la hauteur d'eau devient suffisante, on peut recueillir des échantillons d'eau du fond et l'on constate qu'à la salinité élevée (30 ‰) correspond une température de 16°8-17°. Ces eaux n'ont pas subi, comme celles de surface, le réchauffement diurne.

3. VARIATIONS DE TEMPÉRATURE PAR LE TRAVERS DE LA POINTE DE PENZORNOU (PENZÉ), LE 11 AOUT 1939 (fig. 28). — En surface, la température croît avec l'apport des eaux saumâtres de l'amont de l'estuaire; la température de l'air, qui passe de 18°7 (à 16 heures) à 16° (à 20 heures), ne semble pas influencer directement la température des eaux de surface.

En profondeur, la température semble suivre une loi à peu près identique, mais avec un décalage cependant, car la température est toujours moins élevée qu'en surface (influence dominante des eaux nettement marines).

Il faut surtout retenir, de ces observations, l'existence d'une stratification thermique et une variation de la température en sens inverse de celle notée au village de Penzé.

#### 4. VARIATIONS DE TEMPÉRATURE DANS L'ESTUAIRE DU BOU-REGREG, EN SEPTEMBRE 1940 :

A. La Tour Hassan, le 16 septembre 1940. — B. M. à 9 h. 02. — H. M. à 15 h. 11.

| Heures | Salinités ‰ |         | Températures |         | Température de l'air |
|--------|-------------|---------|--------------|---------|----------------------|
|        | Fond        | Surface | Fond         | Surface |                      |
| 8 35   | 23,8        | 22,9    | 22°          | 22°     | 21°                  |
| 11 35  | 29,8        | 26      | 20°          | 21°     | 24°                  |
| 14 35  | 32,2        | 32,8    | 20°          | 20°     | 22°                  |

B. Halte de Robinson, le 17 septembre 1940. — B. M. à 9 h. 31. — H. M. à 15 h. 39.

| Heures | Salinités ‰ |         | Températures |         | Température de l'air |
|--------|-------------|---------|--------------|---------|----------------------|
|        | Fond        | Surface | Fond         | Surface |                      |
| 9 45   | 16,2        | 15,5    | 24°          | 24°     | 21°                  |
| 12 45  | 26          | 26,5    | 22°          | 22°5    | 22°                  |
| 15 45  | 36          | 31,3    | 20°          | 21°     | 24°                  |

On peut noter, d'après ces tableaux : 1° une faible différence entre la température des eaux de surface et du fond, liée à de très faibles différences dans la salinité; 2° une diminution de la température avec le plus grand pourcentage d'eau de mer, qui a le pas ici sur l'augmentation de la température de l'air.

Il n'y a aucun doute qu'au Maroc, en été, les eaux douces sont plus chaudes que les eaux marines, et c'est ce que confirment les mesures qui ont été effectuées.

Si l'on progresse plus en amont dans l'estuaire et qu'on atteigne la Ferme Gibert, on peut observer une variation différente de la température, en rapport avec le faible volume d'eau qui subsiste à basse mer (profondeur : 1 m.), et par conséquent une grande facilité de réchauffement diurne.

#### 5. VARIATIONS DE TEMPÉRATURE DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE, EN JUIN 1942 :

| Températures | Nantes-Chantenay |      |     |      |      |      | La Maréchale |     |      |      |      |      |
|--------------|------------------|------|-----|------|------|------|--------------|-----|------|------|------|------|
|              | 28-6             |      | 2-6 |      | 4-6  |      | 28-6         |     | 2-6  |      | 4-6  |      |
|              | Air              | Eau  | Air | Eau  | Air  | Eau  | Air          | Eau | Air  | Eau  | Air  | Eau  |
|              |                  |      |     |      |      |      |              |     |      |      |      |      |
| Minima.....  | 13°              | 19°  | 14° | 18°  | 18°  | 20°  | 14°          | 21° | 16°  | 16°  | 17°  | 19°  |
| Heures.....  | 4 30             | 4 30 | 5   | 6 30 | 6 30 | 6 30 | 5            | 5   | 5 30 | 5 30 | 5 30 | 5 30 |
| Maxima.....  | 25°              | 24°  | 25° | 23°  | 27°  | 25°  | 21°          | 23° | 23°  | 19°5 | 27°  | 22°  |
| Heures.....  | 14               | 14   | 16  | 16   | 16   | 16   | 15           | 15  | 15   | 15   | 16   | 16   |

| Températures | Saint-Nazaire |       |       |     |      |      |      |      |      |
|--------------|---------------|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|
|              | 28-6          |       |       | 2-6 |      |      | 4-6  |      |      |
|              | Air           | Eau   |       | Air | Eau  |      | Air  | Eau  |      |
|              |               | S.    | F.    |     | S.   | F.   |      | S.   | F.   |
|              |               |       |       |     |      |      |      |      |      |
| Minima.....  | 15°           | 17°2  | 16°   | 18° | 15°5 | 14°5 | 18°  | 17°  | 16°5 |
| Heures.....  | 5 30          | 5 30  | 5 30  | 6   | 6    | 6    | 6 30 | 6 30 | 6 30 |
|              |               | 16 30 | 16 30 |     |      |      |      |      |      |
| Maxima.....  | 23°           | 21°5  | 20°   | 20° | 18°3 | 18°  | 23°5 | 21°  | 20°  |
| Heures.....  | 14 30         | 10 30 | 10 30 | 12  | 14   | 14   | 15   | 15   | 15   |

1° Comme on le verra dans le prochain chapitre, l'eau est toujours douce tant à Nantes qu'à la Maréchale; il s'ensuit que les variations thermiques de l'eau sont uniquement subordonnées aux variations de température de l'air. C'est ce que montre le tableau :

aux températures minima de l'air (lever du soleil), correspondent les températures minima de l'eau; tandis qu'aux maxima de l'air (entre 14 et 16 heures), correspondent les températures les plus fortes de l'eau. Pour ces deux postes je ne distingue pas l'eau du fond de celle de surface, les différences étant très peu sensibles et irrégulières.

2° A Saint-Nazaire, au contraire, où se fait sentir la marée de salinité, la température de l'eau ne suit plus seulement la température de l'air. L'exemple le plus typique est sans doute celui qu'on observe le 28 juin (fig. 29) : la température de l'eau (au fond ou en surface)

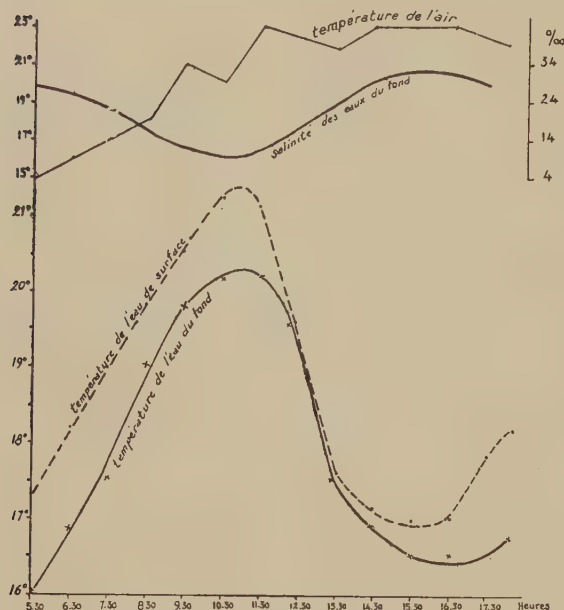


FIG. 29. — Estuaire de la Loire.  
Variations de la température  
au cours de la marée à Saint-Nazaire (2-vi-1942).

est minimum à 5 h. 30 (haute mer :  $S. = 28 ‰$ ), en même temps que celle de l'air, mais alors qu'elle croît régulièrement jusqu'à 14 ou 15 heures, elle passe par un maximum à 10 h. 30 (correspondant à la basse mer :  $S. = 10 ‰$  et  $6 ‰$ ); puis décroît dès lors régulièrement pour atteindre, à 13 h. 30 (correspondant à la haute mer), le même minimum que le matin à 6 h. 30.

Les autres jours, les mêmes remarques pourraient être faites, mais elles apparaissent moins nettement.

On peut donc conclure que les eaux marines plus froides de plusieurs degrés que l'eau douce fluviale. Pour corroborer cette conclusion, deux observations peuvent être ajoutées :

1° La stratification thermique, peu décelable à Chantenay et à la Maréchale, est toujours observable à Saint-Nazaire, les eaux du fond plus salées étant plus froides que les eaux de surface.

2° Si l'on note les températures observées à un moment aux trois postes, on s'aperçoit qu'elles sont décroissantes d'amont en aval :

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| le 28 juin, températures | minima : 19°, 21°, 17°2;  |
|                          | maxima : 24°, 23°, 21°5;  |
| le 2 juin, températures  | minima : 18°, 16°, 15°5;  |
|                          | maxima : 23°, 19°5, 18°3; |
| le 4 juin, températures  | minima : 20°, 19°, 17°;   |
|                          | maxima : 25°, 22°, 21°;   |

### 3. — Températures le long des rives.

En quelques stations d'observation, j'ai mesuré la température de l'eau, en surface et près du fond, le long des rives.

1° Hiver. — A Trégarvan (fig. 30), la température le long des rives varie sensiblement de la même manière que celle de l'eau de surface au milieu (salinité à peu près iden-

tique). Toutefois, peut-on remarquer que la température de l'eau augmente avec le jusan, alors que c'est l'inverse qu'on aurait pu s'attendre à constater.

2° *Eté*. — A Trégarvan (fig. 31), on constate que la température de surface (mais aussi au fond, qui est toujours voisin de 1 m.) augmente tant que dure le flot, alors qu'au milieu, elle décroissait pendant les dernières heures de flot. Il faut penser, pour interpréter ce phénomène, que les rives vaseuses et de couleur noire, se réchauffent pendant tout le temps qu'elles sont découvertes, et qu'à leur tour elles cèdent une partie de leur chaleur à l'eau qui vient les recouvrir avec le flot.

#### 4. — Remarques générales sur la répartition des températures des eaux d'estuaire.

Les résultats qui viennent d'être exposés permettent certaines remarques générales.

1° *En hiver*, dans les régions tempérées (Bretagne) et au Maroc, les eaux douces fluviales sont toujours plus froides que les eaux marines. Comme c'est à cette époque que le débit fluvial est maximum, il en résulte que les eaux de surface (salinité faible ou nulle) ont une température plus basse (de l'ordre de 1° à 2°) que les eaux profondes (salinité élevée) = inversion de température.

D'une manière générale, les eaux de l'estuaire ont, à cette époque de l'année, une température comprise entre la température de l'eau de mer et celle de l'eau douce, d'autant plus proche de la première que le pourcentage de l'eau de mer est plus élevé et inversement.

La variation de la température, en un lieu d'observation, aussi bien pour les eaux de surface que pour les eaux profondes, est bien plus fonction du rapport eau fluviale/eau de

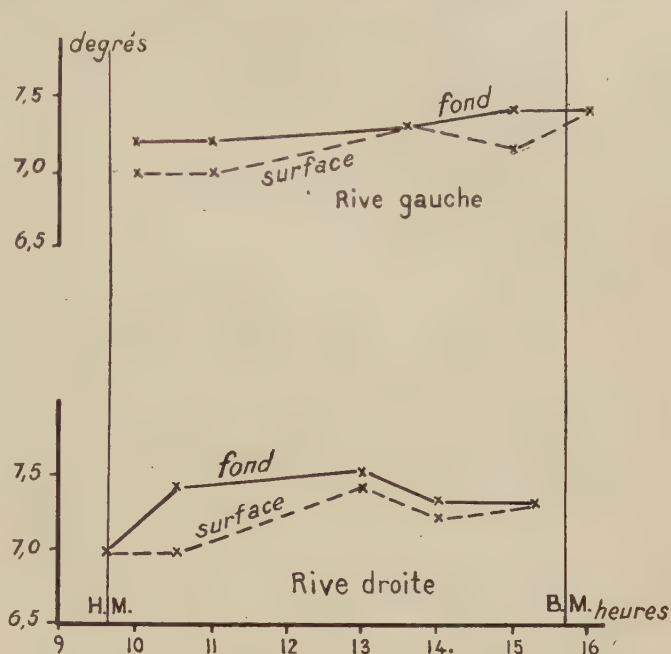


FIG. 30.

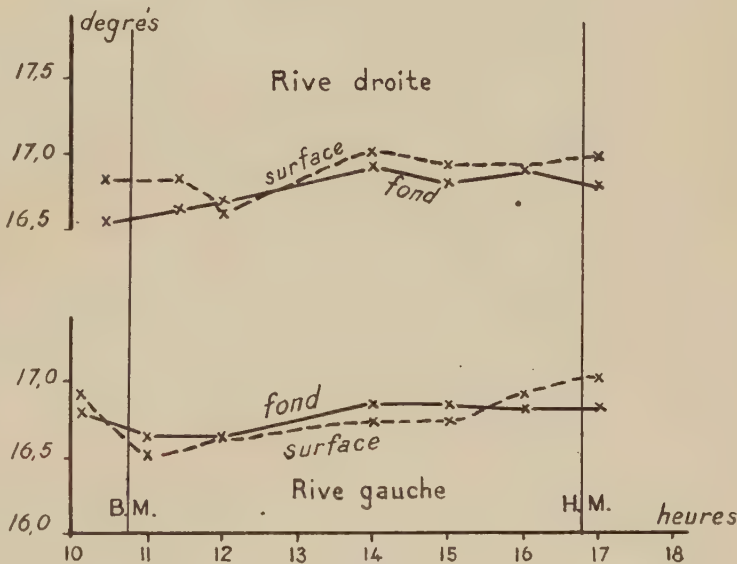


FIG. 31.

FIG. 30 et 31. — Variations de la température, le long des rives, à Trégarvan (estuaire de l'Aulne), au cours d'une marée, — en hiver (fig. 30) et en été (fig. 31).

mer que de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. La variation diurne n'apparaît que très rarement.

2° *En été*, il est plus difficile d'énoncer une règle générale quant au rapport de la température des eaux fluviales et des eaux marines. C'est, suivant les cas, tantôt l'une, tantôt l'autre qui est la plus élevée.

Il est assez rare d'observer une stratification thermique nette; les eaux de surface et les eaux profondes ont presque toujours des températures très voisines.

La variation diurne de la température est, en général, beaucoup plus fonction du rapport eau de mer/eau fluviale que de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon (très net exemple de l'estuaire du Bou-Regreg).

Cependant, fait remarquable, la température des eaux de l'estuaire a généralement une température supérieure à celle de l'eau fluviale et de l'eau de mer. Il faut en rechercher la raison dans le fait que tout un compartiment d'eau ne peut atteindre la mer au cours du jusant, et que, par conséquent, ce volume se trouve réchauffé au cours de la journée. C'est lui qui, par exemple, au village de Penzé, fait passer la température de 14° (eau fluviale) à 18°, tandis que l'eau de mer n'atteint que 17°.

3° *Les différences de température*, entre l'été et l'hiver, des eaux des estuaires bretons sont assez importantes. La température moyenne d'été est de + 17°; la température moyenne d'hiver est de + 6°, + 7°, soit une amplitude de l'ordre de + 10°.

Au Maroc, l'amplitude de la variation est moins grande par suite surtout de températures d'hiver plus élevées.

Je n'ai pu effectuer de mesures de température qu'en été et en hiver, et au mois de juin 1942, sur l'estuaire de la Loire. Les résultats moyens obtenus dans l'estuaire de la Tees et ceux de la Loire montrent que les saisons intermédiaires, printemps et automne, voient le régime des températures se modifier lentement et passer parfois par un stade où les températures d'eau fluviale et d'eau de mer sont égales en moyenne (cas qui s'est présenté en avril-mai 1930 et 1931, dans l'estuaire de la Tees), pour reprendre ensuite leur caractère des saisons extrêmes.

Afin de mieux saisir toutes ces variations et pouvoir tirer quelques règles générales concernant la distribution, dans le temps et l'espace, de la température dans les estuaires, il eût fallu installer d'une manière permanente, en des points judicieusement choisis, des thermomètres enregistreurs. C'est ce qui sera fait dès que les circonstances permettront de nouveau une libre circulation.

## 5. — Importance et rôle de la température.

On peut se demander s'il y a un grand intérêt à effectuer ainsi des mesures très nombreuses de température dans les eaux d'estuaire.

1° Pour répondre à cette question, il suffit de se reporter aux résultats qui viennent d'être donnés pour se rendre compte que, du point de vue de l'écologiste, des variations de température de 4°, comme celles qui ont lieu en quelques heures (ou même quelques minutes) au village de Penzé, ne sont pas sans avoir, au même titre que les variations de salinité, une influence sur la répartition de la faune et de la flore locale.

Les estuaires sont, d'autre part, les points délicats à franchir dans l'itinéraire d'un

poisson migrateur eurhyalin potamotoque ou thalassotoque. Comme on l'a vu, en été et en hiver, existent généralement des différences assez marquées entre la température des eaux douces, des eaux saumâtres et des eaux marines. En hiver, il peut y avoir plusieurs degrés de différence entre la température de couches d'eau situées à profondeurs différentes. C'est au printemps que la plupart des poissons migrants se présentent dans les estuaires, et c'est en effet en cette saison que les différences de température entre les eaux fluviales et marines sont les moins marquées : il y a en somme homothermie.

Le biologiste a donc intérêt à connaître très bien le régime des températures des eaux d'estuaire.

2° Si l'on se place maintenant du point de vue de l'hydrodynamicien, on s'aperçoit que la connaissance de la température des eaux aux différentes profondeurs est importante :

a) Parce qu'elle influe directement sur la densité des eaux :

La densité de l'eau augmente quand la température diminue. Ce facteur de variation est cependant faible par rapport à la teneur en sels dissous : en effet, une différence de 1 gr. de sel par litre fait varier la densité comme une différence de température de 4°. Or, même en hiver, on n'observe guère des différences de température entre les eaux de différentes profondeurs qui dépassent 2° à 3°, tandis qu'il n'est pas extraordinaire qu'entre l'eau de surface et l'eau du fond, on mesure des différences de l'ordre de 30 gr. de sels par litre.

b) Parce qu'elle constitue le principal facteur de variation du coefficient de viscosité :

A titre d'indication, il est bon de donner quelques valeurs du coefficient de viscosité de l'eau douce en rapport avec la température, selon un tableau de J. DUCLAU (1934) : 5° : 0,01525; 10° : 0,01301; 15° : 0,01138; 20° : 0,01006. Ces valeurs sont absolues. On voit donc que la viscosité de l'eau pure diminue quand la température augmente. Mais il ne faut pas oublier que la viscosité de l'eau augmente quand la teneur en sels augmente : ainsi, si la viscosité de l'eau pure est égale à l'unité, celle d'une eau contenant 58 gr. de sels (NaCl) par litre est de 1,086.

Il faut donc considérer qu'à *une même époque de l'année*, les variations de température n'auront qu'une très faible influence sur la densité et la viscosité des eaux par rapport à l'influence des variations de teneurs en sels.

Par contre, d'une saison à l'autre, il y a lieu de tenir compte de l'amplitude de la variation de température qui change le coefficient de viscosité moyen et la densité moyenne, dans des proportions suffisantes pour que le mélange ou la diffusion se fassent dans des conditions différentes. En hiver, le mélange des eaux douces et des eaux salées se fera plus difficilement qu'en été, et le coefficient de diffusion des sels de l'eau de mer dans l'eau moins salée sera influencé dans le même sens.

### CHAPITRE III. — LA SALINITÉ

#### 1. — Méthodes de mesures; expressions des résultats.

Il n'est pas question de revenir une fois de plus sur les avantages et les inconvénients de telle ou telle méthode pour mesurer la salinité d'une eau. En ce qui concerne la détermination de la salinité des eaux dans les estuaires, la précision absolue n'a pas besoin d'être grande; il suffit que, pour un même estuaire (et, si cela était possible, pour tous les estuaires), on utilise une seule et même méthode, avec, de préférence, un seul et même opérateur. Les variations de salinité ont une très grande amplitude et, ce qui pré-

sente de l'intérêt, ce n'est pas tant de mesurer une salinité absolue à un moment donné, en un point donné, que de pouvoir suivre les variations, en un point, sur un certain temps, et, en de nombreux points, à un même instant. Il s'agit donc de mesures relatives et comparatives.

Les conditions matérielles dans lesquelles j'ai travaillé n'ont jamais été favorables à des mesures très précises, que ce soit au Maroc ou en Bretagne. Mais, pour chaque estuaire, la méthode a toujours été la même et c'est toujours moi qui fus l'opérateur. Les valeurs mesurées sont comparables.

Dans l'estuaire de l'Aulne, la salinité a été déterminée au densimètre; dans celui de la Penzé et du Bou-Regreg, au nitrate d'argent (méthode de Knudsen). Il est bon de remarquer d'ailleurs que la formule de Knudsen :  $S. = 0,03 + 1,805 Cl$ , est faite pour les eaux marines où le rapport entre les différents ions demeure sensiblement constant : son application aux eaux douces et saumâtres peut donc être la source d'une erreur, ici, négligée.

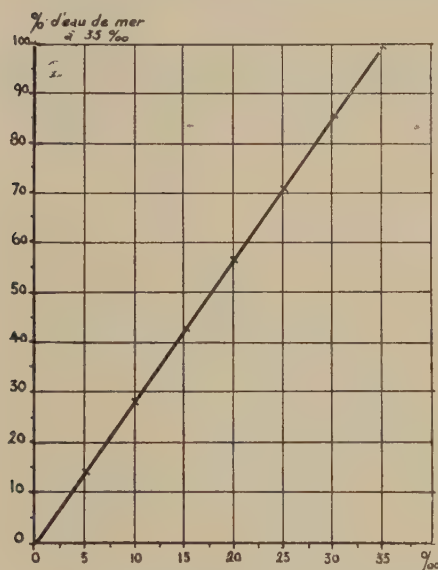


FIG. 32. — Equivalence entre le degré de salinité et le pourcentage d'eau de mer.

On exprime très généralement en océanographie la salinité, en disant que telle eau a une salinité de tant de grammes de sels pour 1.000 gr. d'eau. Mais, dans un estuaire, il peut être parfois plus intéressant d'exprimer la salinité par le pourcentage d'eau de mer qui donne l'influence dominante (rapport eau de mer/eau douce).

Pour établir ce pourcentage, je suis parti d'une eau de mer dont la salinité serait de 35 gr. ‰ (salinité normale).

La correspondance entre les deux expressions est donnée dans le tableau suivant et le graphique (fig. 32) :

| Salinités<br>(gr. ‰) | Pourcentage<br>d'eau de mer |
|----------------------|-----------------------------|
| 35                   | 100                         |
| 30                   | 86                          |
| 25                   | 71                          |
| 20                   | 57                          |
| 15                   | 43                          |
| 10                   | 28                          |
| 5                    | 14                          |
| 1                    | 3                           |

Les auteurs anglais, qui ont travaillé sur l'estuaire de la Tees, avaient déjà signalé cette façon d'exprimer les résultats, mais en partant d'une eau de mer à 34 gr. ‰ (mer du Nord).

Le passage de l'eau douce fluviale à l'eau de mer nettement caractérisée est un problème qui peut être abordé en étudiant la répartition des salinités dans les eaux d'estuaires. La salinité est certainement le caractère physicochimique le plus maniable dans ce but et, d'autre part, celui dont la variation a la plus grande amplitude.

Comment se fait le contact fleuve-mer ? Les eaux douces se mélangent-elles rapidement à l'eau de mer ? glissent-elles sur les eaux marines plus denses ? Existe-t-il des eaux saumâtres ? Comment varie la salinité de ces eaux avec la marée, avec le débit fluvial, avec le coefficient de marée ?

Il est bon, tout d'abord, pour rendre l'exposé des résultats plus clair, d'étudier séparément la répartition et les variations de salinité en été (débit fluvial minimum) et en

hiver (débit fluvial maximum). C'est en effet le débit fluvial qui est le principal facteur de variation dans la répartition des salinités dans les eaux fluvio-marines. Le coefficient de marée est également important; mais, au cours de l'année, il passe plusieurs fois par les mêmes valeurs et on peut, aux différentes saisons, alors que le débit fluvial n'est pas le même, effectuer des mesures avec un même coefficient de marée. Une étude vraiment complète aurait donc commencé par exécuter des mesures de salinité pour des débits fluviaux différents et pour un même coefficient de marée, puis une deuxième série de mesures aurait été effectuée avec des coefficients de marée différents et un débit fluvial à peu près constant.

Ainsi obtiendrait-on une idée exacte des phénomènes qui se passent au sein des eaux fluvio-marines, aux différentes époques de l'année. Programme idéal : mais il demande, pour être réalisé, un effort matériellement impossible pour un seul travailleur. L'équipe de la Tees, qui avait un personnel très nombreux à sa disposition, n'a même pas réalisé complètement un tel programme. Il ne faut donc pas s'attendre à trouver ici un exposé complet sur la question du mélange ou du contact eau douce - eau de mer. Au reste, on peut se demander s'il est tout à fait nécessaire d'avoir tous les résultats qu'aurait donné l'exécution du programme idéal de mesures, et si, malgré des insuffisances et des lacunes, il n'est pas possible de tenter de saisir les grandes lignes de la répartition des salinités dans les estuaires.

*Plan d'étude de la salinité des eaux fluvio-marines.* — Dans chaque estuaire, j'ai procédé au plus grand nombre de mesures de salinité. J'ai, habituellement, choisi un certain nombre de stations (4 pour l'Aulne, 4 pour le Bou-Regreg, 3 pour la Penzé, 3 pour la Loire). La station située le plus en aval était en général l'embouchure, tandis que celle d'extrême amont était celle où coulait de l'eau douce (du moins en hiver). A chacune de ces stations, pendant toute la durée du flot, ou pendant toute la durée du jusant, toutes les heures, des échantillons d'eau étaient recueillis au milieu de l'estuaire; l'un en surface, l'un à quelques décimètres du fond et, parfois, d'autres à des profondeurs intermédiaires. En certaines stations, j'ai également fait des prélèvements le long des rives, tant au fond qu'en surface.

Seul, il ne m'était naturellement pas possible de me trouver simultanément aux quatre stations. J'ai donc essayé d'effectuer les mesures pendant trois ou quatre jours consécutifs où le coefficient de marée variait dans une très faible mesure seulement. J'ai, en général, travaillé l'été, mais je n'ai pu recommencer les mesures pour des coefficients de marée différents; en hiver, les difficultés matérielles sont encore plus grandes et je n'ai pu exécuter des mesures aussi complètes et aussi nombreuses que je l'aurais désiré.

## 2. — Les marées de salinité.

On a vu, dans un précédent chapitre, l'allure que prend la marée dans les estuaires. Ce phénomène hydrodynamique se fait sentir plus ou moins loin en amont dans le bas cours d'un fleuve. Mais l'existence de la marée en un point ne veut pas dire que l'eau soit de ce fait salée. La marée, dans beaucoup d'estuaires, affecte les eaux douces qui sont simplement refoulées sans qu'il y ait apport d'eau de mer. A partir d'un certain point situé plus ou moins loin en amont, il n'y a pas de variation de salinité en rapport avec la marée : ainsi l'eau n'est jamais salée dans l'estuaire de la Loire à partir de Paimbœuf, et dans l'estuaire de la Seine à partir de Quillebœuf, ainsi que le montrent les graphiques. Il est évident cependant que le point le plus éloigné de l'embouchure où se font sentir des variations de salinité dépend du coefficient de marée et du débit fluvial,

et par conséquent de l'époque de l'année. La marée elle-même se fera sentir d'autant plus loin en amont que le débit fluvial est plus faible et que le coefficient de marée est plus élevé.

Mais il est bon de distinguer, dans tous les cas, le phénomène de marée hydrodynamique des variations de salinité. C'est pourquoi je propose d'appeler le premier : *marée dynamique*, et les seconds : *marées de salinité*, dont il va être question dans ce chapitre.

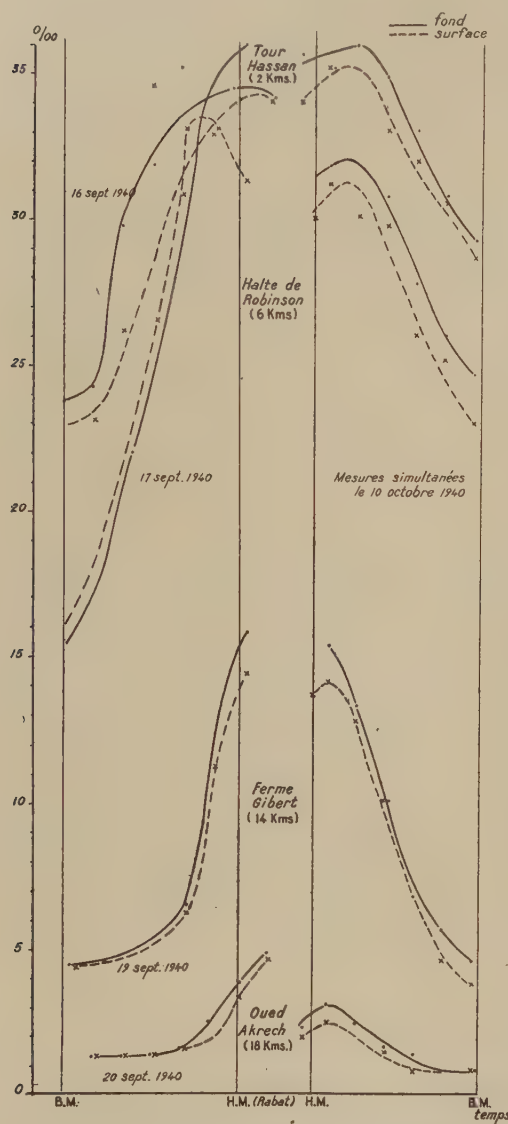


FIG. 33 et 34. — Variations de la salinité, en différentes stations de l'estuaire du Bou-Regreg, en flot et en jusant.

l'eau s'écoule vers l'aval et cette eau est celle de l'oued, donc douce, et c'est pourquoi il n'y a pas stratification.

(1) H. DELMAS (1931) a effectué, dans l'estuaire du Bou-Regreg, quelques mesures de salinité pour une étude de la végétation et des plantes halophiles. Je ne tiendrai pas compte de ces résultats qui, intéressants en eux-mêmes, ne sont pas très nombreux.

#### A. — RÉGIME D'ÉTÉ (OU D'ÉTIAGE)

I. VARIATIONS DE SALINITÉ, AU COURS DU FLOT ET DU JUSANT, DANS L'ESTUAIRE DU BOU-REGREG (1) :

1. *Flot.* — 16 septembre 1940. Hauteur de la marée (marégraphe de Rabat) : 3 m. 30; débit fluvial d'été insignifiant (fig. 33).

Interprétation des graphiques :

1° A toutes les stations d'observation on voit que la salinité est minimum à basse mer et qu'elle est maximum à haute mer. Toutefois, à la passerelle de l'oued Akrech surtout, et même dans une certaine mesure, à la Ferme Gibert, la salinité demeure minimum plusieurs heures après que le flot ait commencé à se faire sentir à l'embouchure. Ce retard évident est lié au temps que met l'onde de marée à remonter l'estuaire (voir chapitre I<sup>er</sup>, II<sup>e</sup> partie).

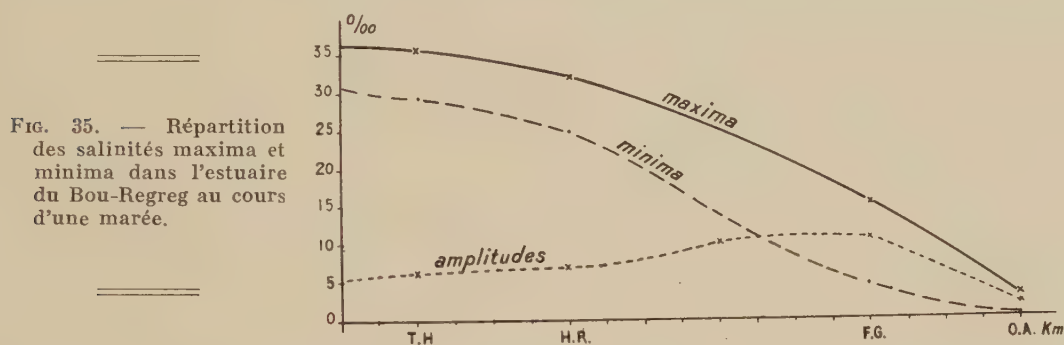
2° D'une manière générale, les eaux de surface ont une salinité qui varie de la même manière que celle des eaux près du fond (à la Tour Hassan, cette règle n'est pas aussi évidente).

3° La salinité des eaux, au fond, est toujours supérieure à celle des eaux de surface : il y a donc stratification densimétrique ou gradient vertical de salinité. Pendant les premières heures de flot, à la passerelle de l'oued Akrech,

En fin de flot, à la Tour Hassan et à la Halte de Robinson (1), il y a inversion : l'eau est plus salée en surface qu'au fond, anomalie due peut-être à des tourbillons à axes horizontaux. Etant donné le faible débit fluvial, les différences de salinité entre le fond et la surface sont cependant toujours assez faibles. La différence maximum s'observe, à la Tour Hassan, deux heures après la Basse mer, avec près de 4 ‰. Aux autres stations, cette différence atteint rarement 1 ‰.

4° L'amplitude de la marée de salinité n'est pas la même en tous points de l'estuaire. Déjà importante à la Tour Hassan avec 10 ‰, elle croît jusqu'à la Halte de Robinson, où elle atteint 16 ‰, après quoi elle décroît lentement : 12 ‰ à la Ferme Gibert, elle n'est même pas de 4 ‰ à l'oued Akrech.

5° Il faut enfin noter que la salinité, à tout moment (exception faite pour la dernière heure de flot à la Halte de Robinson), décroît de l'aval vers l'amont, ainsi que l'indiquent les graphiques des salinités maxima et des salinités minima (fig. 35).



2. *Jusant*. — 10 octobre 1940. Hauteur de la marée : 2 m. 70 ; débit fluvial insignifiant (fig. 34).

Interprétation des graphiques :

1° La salinité est maximum, à toutes les stations, environ 1 heure après la haute mer ; par contre elle est minimum à basse mer.

Comme dans les précédents graphiques, on voit qu'à l'exception de la station oued Akrech, la salinité commence à croître dès l'heure de basse mer ; on est conduit à estimer que la durée du jusant, pour les trois premières stations, dure un peu moins longtemps que le flot (en employant ici jusant et flot dans un sens de durée de marée de salinité et non de courant).

2° Plus nettement qu'en flot, les salinités des eaux de surface et de fond varient parallèlement.

3° La salinité des eaux de fond est toujours supérieure à celle des eaux de surface : il y a donc dans ce cas, en jusant, une stratification par ordre de densité, bien que les différences de salinité ne dépassent guère 1 ‰.

Cette stratification densimétrique indique un régime hydrodynamique plus calme

(1) On remarquera que les courbes de salinité concernant la Halte de Robinson ont, en fin de flot, une allure anormale : la salinité en surface prend subitement une valeur élevée, alors qu'au fond la salinité s'abaisse notablement. Je ne peux interpréter logiquement ces résultats (le régime tourbillonnaire est très faible au voisinage de l'étalement) et je pencherai plutôt pour une erreur expérimentale : intervention des notations sur le cahier d'expérience ou intervention des bouteilles d'échantillon.

que le précédent, ce qui d'ailleurs est naturel puisque l'écoulement fluvial et le courant de marée (jusant), se font dans le même sens et en suivant la pente naturelle du lit de l'estuaire.

4° L'amplitude de la marée de salinité est partout plus faible que dans le cas de flot, ainsi que le montre le graphique; c'est à la Ferme Gibert qu'ici elle est maximum : il y a donc un déplacement net vers l'amont.

5° Les graphiques des salinités maxima et minima (fig. 35) indiquent des valeurs toujours décroissantes de l'amont vers l'aval de l'estuaire.

3. *Comparaison des graphiques de flot et de jusant.* — Les deux séries de graphiques ne sont pas rigoureusement comparables par suite de la différence entre les coefficients de marée (hauteur de 3 m. 30 pour les observations en flot et 2 m. 70 pour celles de jusant). Mais cette différence permet justement de souligner l'importance du coefficient de marée qui se traduit par une moins grande amplitude de la marée de salinité (en rapport avec l'amplitude de la marée dynamique) et une pénétration d'un moins grand volume d'eau de mer : salinité maximum, à l'oued Akrech, plus faible avec le coefficient de 2 m. 70.

On se rend compte facilement qu'en jusant la stratification densimétrique est plus constante qu'en flot.

En amont de l'oued Akrech, la marée dynamique s'amortit rapidement et devient sensiblement nulle à partir de la confluence de l'oued Grou.

Dans l'ensemble, en été (étiage), *marée de salinité et marée dynamique se confondent dans cet estuaire.*

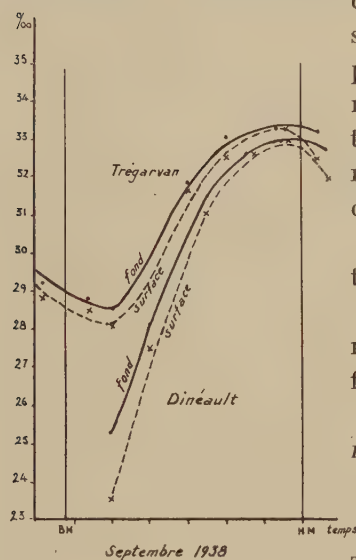


FIG. 36. — Variations de la salinité, à Trégarvan et à Dinéault, dans l'estuaire de l'Aulne, au cours du flot (septembre 1938).

II. VARIATIONS DE SALINITÉ, AU COURS DU FLOT, DANS L'ESTUAIRE DE L'AULNE. — Stations d'observations principales : Trégarvan (7 septembre 1938), Dinéault (8 septembre 1938). Coefficient de marée (Brest) : 61; débit fluvial d'été insignifiant. — Stations auxiliaires : Landévenec (10 septembre 1938). Port-Launay (19 septembre 1938).

A. *Interprétation des graphiques de Trégarvan et Dinéault* (fig. 36). — 1° Les minima de salinité s'observent après la basse mer et les maxima 30 minutes avant la haute mer. On peut donc en déduire que le flot dure moins longtemps que le jusant, ce qui est remarquable, étant donné la proximité de l'embouchure (10-12 km.) et le degré de salinité élevé atteint ( $33\text{ ‰} = 90\%$  d'eau de mer).

2° La salinité des eaux varie de la même manière en surface et au fond.

3° La salinité est toujours plus élevée au fond qu'en surface : il y a toujours stratification par ordre de densité, mais elle est très faible.

4° L'amplitude de la marée de salinité est plus grande à Dinéault qu'à Trégarvan : elle est de 10 ‰ à Dinéault, et de 5 ‰ à Trégarvan, pour les eaux de fond.

5° La salinité est constamment plus faible à Dinéault qu'à Trégarvan.

## B. Stations auxiliaires :

| Heures | Landévenec |            | Localités         | Heures | Salinités | Profondeur |
|--------|------------|------------|-------------------|--------|-----------|------------|
|        | Salinités  | Profondeur |                   |        |           |            |
|        |            | M.         |                   |        |           | M.         |
| 11 20  | 33,97      | 0          | Aval              | 16 30  | 10,97     | 0          |
| —      | 33,97      | 15         | »                 | —      | 15,19     | 3,30       |
| 14 30  | 34,10      | 0          | Amont             | 17 10  | 3,19      | 0          |
| —      | 34,47      | 15,50      | »                 | —      | 12,21     | 3          |
| 16 55  | 33,97      | 0          | Port-Launay. .... | 17 55  | 3,19      | 0          |
| —      | 34,85      | 16         | »                 | —      | 8,50      | 3,40       |
|        |            |            | »                 | 18 45  | 1,84      | 0          |
|        |            |            | »                 | —      | 7,76      | 3,20       |

B. M. : 12 h. 20; H. M. : 18 h. 30. B. M. : 11 h. 15; H. M. : 17 h. 26.

Ce tableau secondaire permet de faire quelques constatations supplémentaires :

1° A Landévenec (embouchure), la valeur de la salinité est toujours élevée, l'ampli-

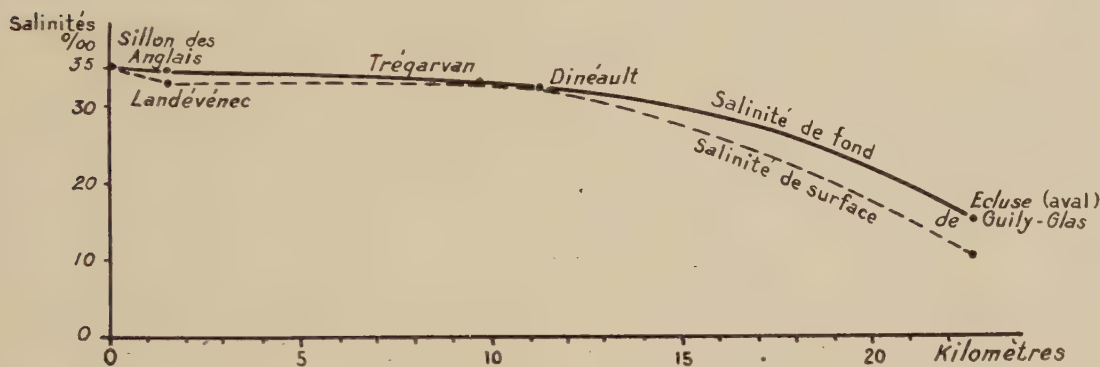


FIG. 37. — Répartition des salinités maxima, au cours d'une marée, dans l'estuaire de l'Aulne (septembre 1938).

tude de la marée de salinité atteint à peine 1 ‰. La stratification par ordre de densité est insignifiante, ou nulle.

2° A l'écluse de Guily-Glas et à Port-Launay, la situation est particulière par suite de l'existence même de l'écluse qui n'est ouverte que quelque temps avant la haute mer (quand le niveau de l'eau dans l'estuaire atteint le plan d'eau du barrage déversoir). En aval de l'écluse, avant son ouverture, une heure avant la haute mer, la salinité est relativement importante et la stratification par ordre de densité élevée (plus de 4 ‰ de différence entre la salinité de surface et celle du fond).

En amont, quelques minutes après l'ouverture de l'écluse, l'eau de mer pénètre brutalement par le fond, puisque la salinité y est de 12,21 ‰, tandis qu'en surface, elle atteint seulement 3,19 ‰.

Plus en amont encore, à Port-Launay, on note, au fond, une salinité de 8,50 ‰, tandis qu'en surface, l'eau n'est pas moins salée qu'à l'écluse (une heure auparavant). Des mesures effectuées 50 minutes après montrent bien déjà, par des salinités moindres, l'influence du jusant (l'écluse étant toujours ouverte).

Ces quelques résultats, joints aux observations continues faites à Trégarvan et à

Port-Launay, permettent de construire la courbe de salinités maxima dans l'estuaire. Elle affecte une allure très semblable à celle que l'on obtenait dans le Bou-Regreg; elle permet de constater une salinité régulièrement décroissante de l'aval vers l'amont (fig 37). Ce n'est vraisemblablement qu'à Châteaulin qu'il y a constamment de l'eau douce.

Dans le cas de l'Aulne par conséquent, en été, la marée de salinité se confond avec la marée dynamique.

III. VARIATIONS DE SALINITÉ, AU COURS DU FLOT, DANS L'ESTUAIRE DE LA PENZÉ (fig. 38 et 39). — Stations d'observation :

|                                                                 | Coefficient de marée |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|
| Penzé (pont du village), 17 août 1939 et 21 septembre 1941..... | 104                  |
| Pont de la Corde, 22 septembre 1941..                           | 106                  |
| Penzornou, 11 août 1939 .....                                   | 79                   |

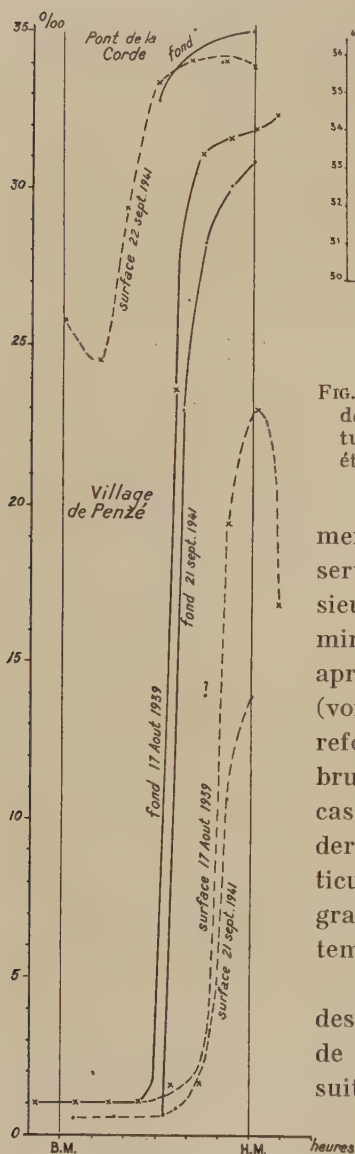


FIG. 38.

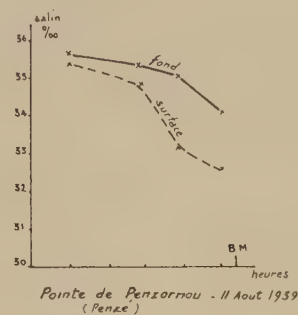


FIG. 39.

FIG. 38 et 39. — Variations de la salinité dans l'estuaire de la Penzé en été.

Débit fluvial d'été insignifiant.

A. L'estuaire de la Penzé se termine au Pont de Penzé : immédiatement en amont de ce pont, existe un petit barrage dont la retenue sert à faire fonctionner un moulin. A basse mer, et pendant plusieurs heures du jusant, en été, il ne s'écoule sous le Pont qu'un mince filet d'eau douce (20-30 cm. de hauteur); quelques heures après que le flot ait commencé à se faire sentir en baie de Morlaix (voir chap. I<sup>er</sup>, II<sup>e</sup> partie), affluent des eaux saumâtres et salées refoulées, le niveau monte immédiatement et d'une manière très brusque. Finalement, par marées de vives eaux, comme ce fut le cas aux dates d'observation, le barrage est dépassé au cours de la dernière heure de flot. Si j'insiste sur ces conditions très particulières du village de Penzé, c'est qu'il faut expliquer les graphiques qui représentent les mesures d'août 1939 et de septembre 1941 :

1° Ce qui frappe au premier abord, c'est l'identité d'allure des courbes obtenues en 1939 et 1941. L'amplitude de la variation de salinité est seulement moins grande en septembre 1941, par suite vraisemblablement d'un plus grand apport d'eau douce.

2° L'eau douce s'écoule vers la mer pendant les trois premières heures de flot, puis très brusquement (en l'espace de quelques minutes), arrivent les eaux refoulées par l'onde de flot et la salinité de l'eau, au fond, qui passe sous le pont vers l'amont, atteint plus de 23 ‰ (août 1939); en surface, il reste encore, pendant un certain temps, de l'eau douce. Finalement, pendant les deux dernières heures de flot, la salinité est relativement élevée, tant au fond qu'en surface. On notera aussi une très rapide diminution de la salinité de l'eau en surface au mois d'août 1939, dès que le flot cesse de se faire sentir.

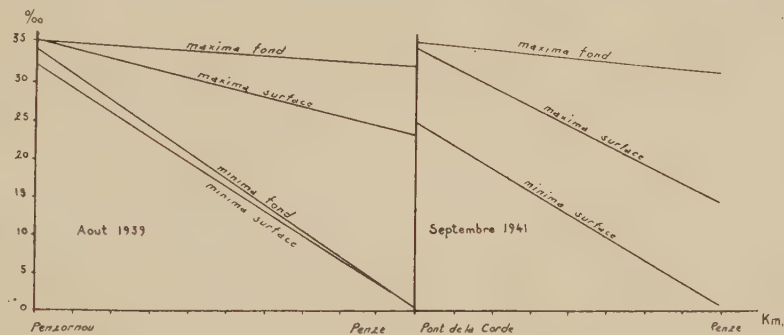
3° Il y a donc, dès que le flot se fait sentir, une stratification densimétrique très nette : 9 ‰ à haute mer (août 1939) et 17 ‰ à haute mer (septembre 1941). L'amplitude de la marée de salinité atteint donc :

|                     |       |        |                          |       |      |
|---------------------|-------|--------|--------------------------|-------|------|
| Août 1939 : surface | ..... | 22,5 ‰ | Septembre 1941 : surface | ..... | 14 ‰ |
| fond                | ..... | 32 »   | fond                     | ..... | 31 » |

b. Au Pont de la Corde, situé à 6 km. en aval du village de Penzé, la variation de salinité, au cours du flot, apparaît beaucoup plus normale. Il manque malheureusement quelques mesures de salinité des eaux profondes. On notera : 1° que le minimum de salinité pour les eaux de surface se situe une heure après basse mer, mais le maximum s'étend sur les deux dernières heures de flot, tandis qu'en profondeur, il a lieu à haute mer avec une salinité marine (35 ‰); 2° que l'amplitude de la marée de salinité n'atteint pas tout à fait 10 ‰ valeur normale et qui n'a pas le caractère si particulier de celle que l'on observe à Penzé.

c. Des mesures effectuées par le travers de la Pointe de Penzornou (fig. 39), en août 1939, indiquent déjà très nettement l'approche de conditions marines. Ce n'est, en

FIG. 40.  
Répartition  
des salinités  
maxima et minima,  
en été,  
dans l'estuaire  
de la Penzé.



effet, que pendant les trois dernières heures de jusant que la salinité s'abaisse un peu — tant au fond qu'en surface — et qu'apparaît une stratification densimétrique. On notera que l'amplitude de la marée de salinité est insignifiante : 3,85 ‰ pour les eaux de surface et 1,49 ‰ pour celles de fond.

d. A la même époque, par le travers de la pointe de Roch'Illicvec, la salinité varie d'une manière insignifiante entre la basse mer et la haute mer, et à Roscoff, au Laboratoire (devant le vivier), on observe une salinité toujours marine.

En construisant les courbes des salinités maxima et des salinités minima (fig. 40) pour les observations d'août 1939 et septembre 1941, dans l'estuaire de la Penzé (deux points d'observations seulement), on constate : 1° que l'amplitude de la marée de salinité est croissante d'aval en amont; 2° que la stratification densimétrique s'observe bien aux moments opposés de la marée pour les points situés en amont et en aval : en effet, à Penzornou et au Pont de la Corde, c'est à basse mer qu'il y a le plus de différence entre les eaux du fond et celles de surface, tandis qu'à Penzé, la différence est maximum quand elle disparaît à Penzornou (eaux marines).

Par suite des conditions topographiques (barrage du Moulin), qui existent à Penzé, l'onde mécanique de marée ne peut pas se propager au delà de Penzé et, de ce fait, en été, la marée de salinité correspond à la marée dynamique.

VARIATIONS DE SALINITÉ DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE (1). — Les mesures de salinité, comme les autres mesures physicochimiques, ont été effectuées simultanément en trois points : 1° par le travers de Saint-Nazaire; 2° à la Maréchale; 3° à Nantes-Chantenay, par différents coefficients de marée et des débits fluviaux (cote à Montjean) toujours très faibles :

| Dates   | Coefficient de marée        | Cotes à Montjean |
|---------|-----------------------------|------------------|
| 7-7-42  | 48 : morte eau.             | 0,49             |
| 4-6-42  | 74-68 : marée moyenne.      | 1,23             |
| 2-6-42  | 97-91 : vive eau.           | 1,34             |
| 28-6-42 | 100 : marée extraordinaire. | 0,74             |

De ces différentes mesures, on tire quelques conclusions :

1. La marée dynamique se fait sentir au delà de Nantes, mais la marée de salinité est nulle à partir de Paimbœuf, quel que soit le coefficient de marée.

2. La marée de salinité n'a donc été observée que par le travers de Saint-Nazaire. Les courbes qui ont été établies donnent lieu aux observations suivantes (fig. 41) : a) les maxima de salinité s'observent à la haute mer (avec un certain retard pour les eaux de surface); b) les minima de salinité s'observent à basse mer; c) en règle générale, la stratification par ordre de densité est toujours visible, elle est de l'ordre de 2 à 4 ‰, plus nette et plus constante, en jusan qu'en flot.

3. Les valeurs maxima et minima de salinité changent avec le coefficient de marée pour un débit fluvial à peu près constant : l'amplitude de la variation de salinité augmente avec le coefficient de marée; mais, comme il est normal, c'est surtout en surface que ce caractère est le plus net, ainsi que le montre le tableau de la page 205.

4. Par très faible débit fluvial, il apparaît donc que le degré de salinité est encore très influencé par l'eau douce et qu'à l'embouchure de l'estuaire, les eaux ne doivent jamais avoir une salinité franchement marine.

(1) Sur l'initiative de M. GIBERT, directeur du Service maritime de la Loire-Inférieure et grâce à MM. DESBAZEILLE et BARBIER, ingénieurs, et à leurs collaborateurs (marins et dessinateurs), plusieurs séries de mesures physicochimiques ont été effectuées en juin et juillet 1942. J'ai, pour ma part, contribué à ces opérations, en faisant appliquer les techniques que j'avais jusqu'alors utilisées sur les autres estuaires et en assistant, en les contrôlant, aux opérations, aux différents postes, les 2 et 4 juin 1942. Qu'il me soit permis de remercier, pour leur hospitalité et leur amabilité, tous les ingénieurs et le personnel du Service maritime des Ponts et Chaussées de la Loire-Inférieure.

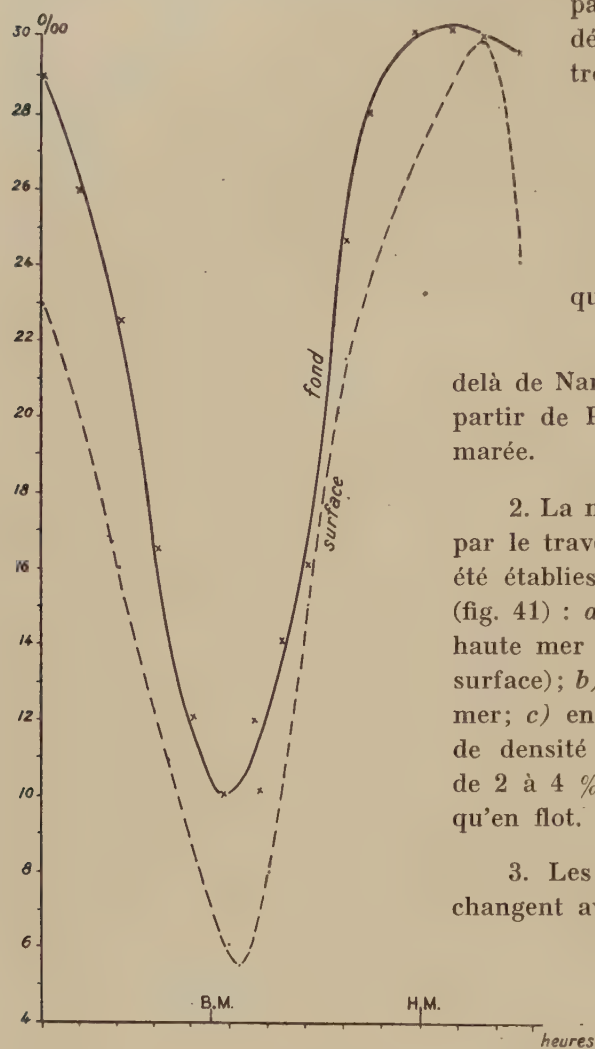


FIG. 41.  
Variations de la salinité, à Saint-Nazaire,  
au cours de la marée (juin 1942).

|                              | Coeff. 100 |         | Coeff. 74-68 |         | Coeff. 97-91 |         |
|------------------------------|------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|
|                              | Fond       | Surface | Fond         | Surface | Fond         | Surface |
| Salinités maxima.....        | 30         | 30      | 23           | 19      | 23,5         | 18,75   |
| » minima.....                | 10         | 5,5     | 3            | 1       | 4            | 2       |
| Amplitude de variation ..... | 20         | 24,5    | 20           | 18      | 19,5         | 16,75   |

Les circonstances actuelles nous ont empêché d'effectuer des mesures dans la partie tout à fait maritime de l'estuaire. Pour avoir une idée de la répartition des salinités dans l'estuaire de la Loire, les mesures devront porter désormais sur des transversales comprises entre la mer et Donges.

Dans l'ensemble, l'estuaire de la Loire rappelle par son régime de salinité celui de la Seine (RAJČEVIĆ), et, par beaucoup de points, le graphique donné fait songer à celui que l'on a, à la Tour Hassan (O. Bou-Regreg), en période de crues.

IV. LA SALINITÉ DES EAUX D'ESTUAIRE, EN ÉTÉ, (ÉTIAGE) D'APRÈS LES RÉSULTATS DE DIFFÉRENTS CHERCHEURS. — Des résultats du type de ceux qui viennent d'être exposés n'ont pas, jusqu'à ce jour, été fournis par d'autres auteurs, soit, en effet, qu'ils aient étudié la répartition des salinités en courbes isohalines (représentation qui sera utilisée plus loin), soit que leurs prises d'échantillons n'aient pas été systématiques et suffisamment nombreuses ou continues pour donner une courbe de marée de salinité.

1. TH. MONOD (1926) a publié quelques résultats de mesures de salinité, au mois de septembre 1924. Elles ont été effectuées dans la Basse Seulle (Normandie), en des points répartis d'amont en aval. L'eau était prise — je suppose — en surface et le long des rives en régime d'été, (débit fluvial insignifiant), à haute mer et à basse mer, en vives eaux et en mortes eaux. Ce qui ressort de ce travail est une grande différence entre les salinités mesurées en mortes eaux et en vives eaux : le rapport des unes aux autres est de 1 à 2 à l'embouchure, et de 1 à 4 au pont de la route de Courseulles à Bayeux.

2. M. PRENANT et M. DUVAL (1926) ont poussé plus loin un travail du même type dans l'estuaire de la Penzé, et ils ont pu montrer que la salinité des eaux de surface est, en règle générale, toujours plus faible que celle des eaux de profondeur, que la salinité décroît d'aval en amont, et enfin qu'au Pont de Penzé les variations de salinité sont brusques et de grande amplitude (influence des conditions locales). Mes propres mesures confirment ces conclusions.

3. Dans l'estuaire de la Tees (1931-1935), les mesures de salinité ont été encore plus nombreuses que les miennes, mais les auteurs ont surtout utilisé la représentation en courbes isohalines. Toutefois, un graphique (p. 11) reproduit une marée de salinité (fig. 42) au mois de juin, au Pont de Stockton, à 17.000 m. en amont de l'embouchure. On peut noter certains caractères de ce graphique : 1° Le maximum de salinité s'observe environ 2 heures après la H. M. 2° Le minimum de salinité est atteint environ à basse mer, mais il se prolonge au moins pendant la

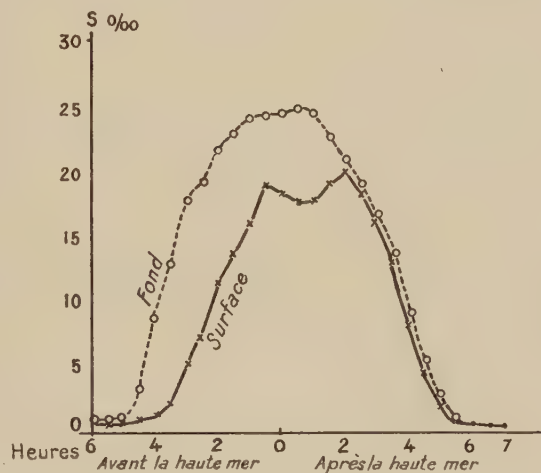


FIG. 42. — Estuaire de la Tees. Variations de la salinité au cours de la marée.

première heure de flot. 3° L'amplitude de la marée de salinité atteint 25 ‰ au fond et 20 ‰ en surface, ce qui rappelle un peu les conditions au village de Penzé, mais la variation est beaucoup moins brusque. 4° Enfin, il y a nette stratification densimétrique pendant tout le flot, tandis qu'au court du jusant, les différences de salinité entre la surface et le fond s'estompent. Ce phénomène est assez inattendu et je ne l'ai pas rencontré.

4. Les travaux de E. FISCHER (1929) dans l'estuaire de la Rance, continués par P. CHAUCHARD (1939-1942) sont intéressants. Mais ces auteurs n'ont pas étudié, en un point, la variation de salinité avec la marée. Le résultats qu'ils ont publiés servent toutefois de points de repère et, par interpolation, on peut les situer dans une courbe de marée de salinité. Je n'insisterai pas, car l'estuaire de la Rance ressemble, par beaucoup de points, à celui de l'Aulne.

#### B. — RÉGIME D'HIVER (OU DE CRUES)

I. VARIATIONS DE LA SALINITÉ, LE 28 OCTOBRE 1940, DANS L'ESTUAIRE DU BOU-REGREG, AU NIVEAU DE LA TOUR HASSAN (fig. 43). — Hauteur de la marée : 3 m. 40. Fort débit fluvial (période de crues).

Le graphique obtenu a une allure totalement différente de celui que l'on avait, à la même station, un mois auparavant, en période d'étiage. Les remarques essentielles sont les suivantes :

1. L'amplitude de la marée de salinité est très grande, puisqu'on passe, au fond, de l'eau à salinité presque marine (33 ‰) à l'eau douce, et qu'en surface, la salinité passe de 28 ‰ à 0,5 ‰ (eau douce).

On constate donc que si, pendant le flot, l'eau de mer remonte l'estuaire, elle est totalement chassée avec le jusant auquel s'ajoute cette fois le courant fluvial, qui est très important par suite de la crue.

2° La stratification par ordre de densité est ici frappante, mais elle est la plus nette (20 ‰) une heure environ après la haute mer. C'est qu'en effet, les eaux douces fluviales légères prennent immédiatement la prépondérance, en surface, dès que le flot cesse de se faire sentir, tandis qu'au fond, où le courant est moins fort, les eaux salées demeurent plus longtemps. En fin de jusant, l'eau étant douce, au fond comme en surface, toute stratification densimétrique disparaît.

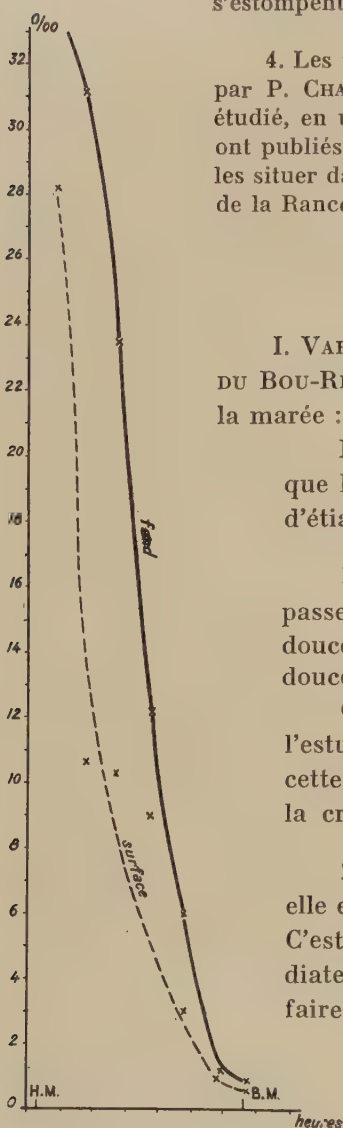


FIG. 43. — Variations de la salinité, à la Tour Hassan (estuaire du Bou-Regreg), en période de crues (28-x-1940).

3. Le maximum, au fond comme en surface, s'observe à haute mer, et le minimum à basse mer. Sans doute, ce minimum doit-il se prolonger durant les premiers moments du flot. Il y a tout lieu de croire, en effet, qu'étant donné le grand apport d'eau douce, le jusant prend une nette prépondérance sur le flot.

II. INFLUENCE DES EAUX FLUVIALES SUR LA SALINITÉ DES EAUX LITTORALES MAROCAINES.  
— Les prises d'eau ont été effectuées, en surface et au fond, à l'aide d'une bouteille ima-

ginée par J. C. VLÈS et moi-même (1941, 14) aux embouchures du Sebou, du Bou-Regreg et de l'Oum er Rebja, au mois de janvier 1941, à bord du « Chasseur 2 ». Pour les stations, se reporter aux cartes (p. 187).

| N <sup>os</sup>   | Oued Sebou |              |             | Oued Bou-Regreg   |              |             | Oued Oum er Rebja |              |             |
|-------------------|------------|--------------|-------------|-------------------|--------------|-------------|-------------------|--------------|-------------|
|                   | Heures     | Salin. surf. | Salin. fond | Heures            | Salin. surf. | Salin. fond | Heures            | Salin. surf. | Salin. fond |
| 1.....            | 8 30       | 34,71        | 36,38       | 16 40             | 32,49        | 36,38       | 10                | 37,49        | 36,78       |
| 2.....            | 8 55       | 20,56        | 36,1        | 16 50             | 23,26        | 35,81       | 10 20             | 35,82        | 36,23       |
| 3.....            | 9          | 13,9         | 36,1        | 16 55             | 23,23        | 35,81       | 10 45             | 36,1         | 36,38       |
| 4.....            | 9 10       | 28,18        | 38,49       | 17                | 29,44        | 36,10       | 11                | 34,16        | 35,05       |
| 5.....            | 9 30       | 32,9         | 36,1        | 17 05             | 36,10        | 36,10       | 11 15             | 36,45        | 35,67       |
| 6.....            | 9 40       | 34,56        | 36,23       | 17 15             | 36,38        | 36,66       | 11 35             | 36,1         | 35,67       |
| 7.....            | 10 15      | 33,88        | 37,49       | 17 30             | 35,55        | 36,93       | 12                | 36,51        | 36,38       |
| 8.....            | 10 40      | 32,77        | 36,93       | 17 40             | 34,71        | 36,38       | 12 45             | 36,78        | 36,73       |
| 9.....            | 10 45      | 37,49        | 36,93       | 19 45             | 31,66        | 35,67       | 13 25             | 35,27        | 37,62       |
| 10.....           | 13 45      | 29,2         | 36,1        |                   |              |             | 13 45             | 29,16        | 36,38       |
| 11.....           | 14 15      | 36,1         | 37,34       |                   |              |             | 14                | 26,94        | 35,12       |
| 12.....           | 14 45      | 34,99        | 37,49       |                   |              |             | 14 05             | 26,67        | 35,55       |
| 13.....           | 15         | 22,5         | 34,71       |                   |              |             | 14 35             | 35,4         | 35,82       |
| 14.....           | 15 30      | 11,01        | 35,55       |                   |              |             | 15 45             | 36,23        | 37,21       |
| H. M. à 10 h. 40. |            |              |             | H. M. à 10 h. 40. |              |             | H. M. à 10 h.     |              |             |

D'après ce tableau, il apparaît que les eaux de surface ont une salinité inférieure à celle des eaux de fond, et cela quelle que soit l'heure de la marée. C'est toutefois en fin de jusant que les eaux douces fluviales ont le plus d'influence. L'analyse détaillée de ces résultats n'est pas inutile :

*Oued Oum er Rebja.* — Les mesures aux St. 1, 2, 3, 4, par exemple, échelonnées entre 10 et 11 heures, permettent de constater que, même au début du jusant, les eaux situées près de l'embouchure (St. 4) sont plus douces que celles qui se trouvent plus au large (en face de Mazagan). De même, les St. 9, 10, 11, 12, entre 13 h. 25 et 14 h. 05, accentuent cette remarque et on voit ainsi, en la St. 9 (à 6 km. au large de l'embouchure), des eaux de surface dont la salinité est de plus de 2 ‰ inférieure à celle des eaux de fond (20 m.). En la St. 12, le phénomène est encore plus visible : les eaux de surface sont près de 9 ‰ moins salées que celles du fond (6 m.). En fin de jusant, à 14 milles dans le NE. d'Azemmour, on peut constater une légère influence fluviale, puisque les eaux de surface sont de 1 ‰ plus douces que celles de profondeur.

En conclusion, on peut dire qu'à cette époque de l'année, les eaux apportées par l'Oum er Rebja à la mer n'ont qu'une assez faible influence sur la salinité des eaux littorales. Ce sont presque essentiellement les eaux de surface qui sont influencées, les eaux de fond gardant une salinité élevée d'une façon presque constante.

*Oued Bou-Regreg.* — Les stations couvrent un espace moins grand que précédemment. Les mesures ne portent que sur une heure, celle qui suit l'étalement de basse mer. Les eaux de surface sont constamment moins salées que celles du fond. Aux stations les plus proches de l'embouchure, la différence de salinité atteint plus de 13 ‰ (St. 2 et 3). A mesure que l'on s'éloigne, la salinité des eaux de surface augmente, tandis que celle du fond demeure toujours très élevée.

*Oued Sebou. — 1° Zone proche de l'embouchure* (1.000 à 1.500 m. des jetées de Mehedia) : Les mesures effectuées aux St. 1, 2, 3, 4, permettent de voir que, même un peu avant la haute mer, les eaux de l'oued Sebou influent encore sur la salinité des eaux de surface tout à fait littorales : 20,56 ‰ (St. 2) et 13,9 ‰ (St. 3).

A presque basse mer, les salinités sont encore plus faibles : 11 ‰ (St. 14). La salinité, plus élevée en la St. 4, tendrait à indiquer que les jetées perturbent les mouvements de la marée et le mélange des eaux, ce qui est plus net dans les mesures qui suivent. En tous les points, la salinité des eaux de surface est plus faible que celle du fond.

*2° Zone éloignée de l'embouchure* (fonds inférieurs à —30 m. : St. 5, 6, 7, 8, 9, 10) : L'influence des eaux douces en jusant se fait sentir jusqu'à la St. 8 vers le Nord (à 16 km. de l'embouchure) : 32,77 ‰ en surface. Au contraire, à la St. 9, voisine de 1.000 m., la salinité est franchement marine. En la St. 12, la salinité est relativement élevée (34,99 ‰), étant donné la proximité de l'embouchure).

En la St 11, la salinité de 36,1 ‰ montre l'influence de la jetée.

On peut donc dire, pour conclure, que l'oued Sebou en jusant a une influence particulièrement nette sur les eaux littorales situées au Nord de son embouchure et que, par contre, elle est très restreinte sur les eaux situées au Sud et SW. des jetées.

*N.-B.* — La salinité a été mesurée, à terre, par le dosage des chlorures au nitrate d'argent. Les valeurs semblent trop élevées pour être considérées comme

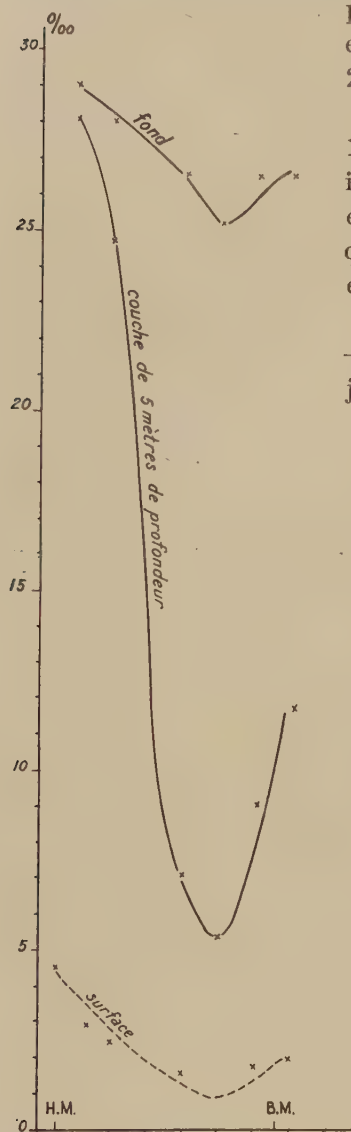


FIG. 44.

FIG. 44. — Variations de salinité, à Trégarvan (estuaire de l'Aulne), au cours de la marée (jusant) en hiver (28-xii-1938).

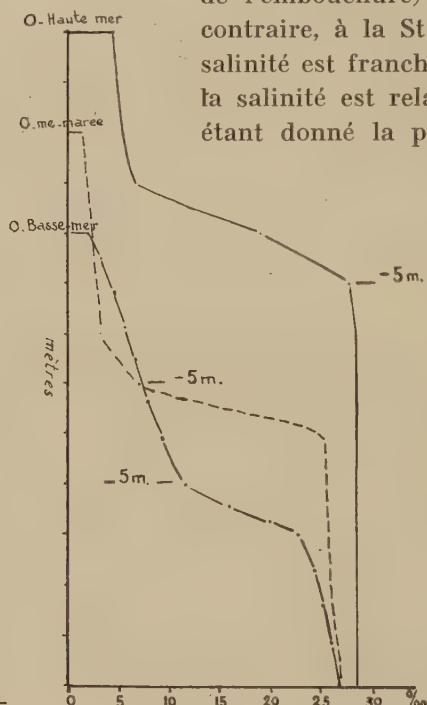


FIG. 45.

FIG. 45. — Variations des différences de salinité, entre les couches superficielles et profondes, au cours de la marée (stratifications).

des valeurs absolues de la salinité, mais elles sont comparables entre elles et c'est ici l'essentiel.

III. VARIATIONS DE SALINITÉ LE 28 DÉCEMBRE 1938, A TRÉGARVAN, DANS L'ESTUAIRE DE L'AULNE. — Coefficient de marée : 50 (donc faible). Débit fluvial important (l'eau douce de la rivière tombe en chutes rapides au barrage de Guily-Glas).

Les courbes de marée de salinité (fig. 44) à cette époque de l'année ne ressemblent en rien à celles obtenues en été. Certaines considérations sont évidentes :

1. Une différence considérable et constante entre la salinité des eaux de surface et celle des eaux du fond (stratification densimétrique); elle est presque tout le temps égale à 25 ‰.

2. L'amplitude de la marée de salinité, en surface ou au fond, n'est pas très grande : 3,65 ‰ en surface et 3,10 ‰ au fond.

3. Le maximum de salinité s'observe à haute mer et le minimum, dans tous les cas, une heure environ avant la basse mer. A l'heure de basse mer, la salinité recommence à croître et on s'explique assez mal cette anomalie, étant donné l'importance du débit.

Etant frappé par la grande différence de salinité entre les eaux de surface et du fond, j'ai mesuré la salinité à des profondeurs intermédiaires. Les résultats obtenus sont intéressants (fig. 45). On voit que le volume d'eau douce augmente dans de fortes proportions au cours du jusant : c'est ainsi qu'à 5 m. de profondeur, on observe une salinité voisine de celle du fond (28 ‰) à haute mer qui diminue rapidement pour être peu élevée 1 h. 30 avant la basse mer. Dans l'ensemble, elle suit donc les mêmes variations que les eaux de surface ou de fond, mais avec une amplitude beaucoup plus considérable, puis qu'elle atteint 22,59 ‰.

Ces différentes mesures permettent de voir que les eaux de densité très différentes ne se mélangent que très peu. A mi-marée, par exemple, le volume d'eau douce et celui d'eau marine sont sensiblement égaux : ils demeurent très individualisés. De 7,02 ‰ à 5 m. de profondeur, la salinité passe à 25,39 ‰ à 6 m. Pourtant, c'est à ce moment de la marée que les tourbillons et la turbulence sont les plus violents. En somme, l'eau douce glisse sur les eaux marines sans s'y mélanger (ou seulement, dans la zone de contact, dans une très faible mesure).

*A l'écluse de Guily-Glas.* — Les eaux sont constamment douces à cette époque de l'année (27 décembre 1938) et le courant est toujours dirigé de l'amont vers l'aval.

*A Landévenec.* — 31 décembre 1938. Coefficient de marée : 50. H. M. à 10 h. 29.

| Heures | Surface | 3 m.    | 4 m.    | 5 m.    | Fond : 15 m. |
|--------|---------|---------|---------|---------|--------------|
| 11 25  | 14,20 ‰ | 19,17 ‰ |         | 29,18 ‰ | 31,86 ‰      |
| 15     | 11,72   |         | 28,13 ‰ | 28,26   | 30,87        |

A l'embouchure même, l'influence fluviale est donc encore très visible, mais on ne retrouve plus de véritables eaux douces : entre Trégarvan et Landévenec, il y a donc eu mélange et ici ce sont des eaux saumâtres (11,72 ‰) qui s'écoulent en surface, tandis qu'en profondeur (fond) le degré de salinité varie peu avec la marée (c'est à peine s'il est plus élevé qu'à Trégarvan). On remarquera aussi qu'il n'y a pas, comme à Trégarvan, de discontinuité nette entre les eaux plus douces et les eaux marines; l'augmentation de salinité est régulière avec celle de la profondeur.

*Remarque.* — Dans l'estuaire de l'Aulne, en hiver, la marée de salinité et la marée dynamique ne s'étendent pas de la même manière vers l'amont : il y a marée dynamique (très faible d'ailleurs) à l'écluse de Guily-Glas, mais la marée de salinité s'arrête quelque part (pas très loin sans doute) en amont de Trégarvan.

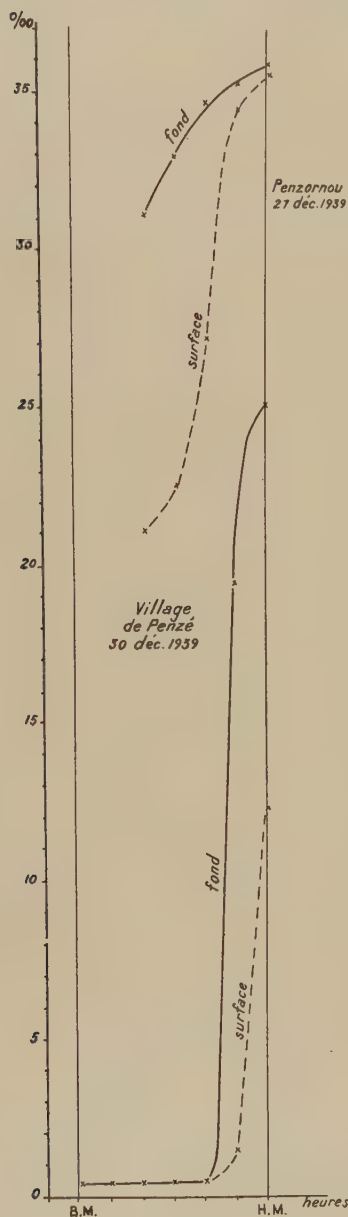


FIG. 46.

#### IV. — VARIATIONS DE SALINITÉ DANS L'ESTUAIRE DE LA PENZÉ :

1. Au village de Penzé, le 30 décembre 1939. Coefficient de marée : 100. Débit fluvial plus fort qu'en été.

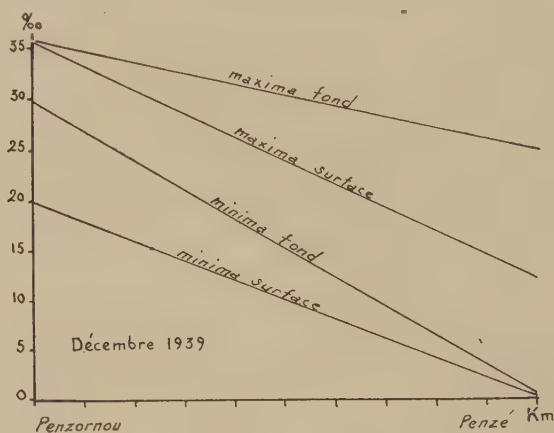


FIG. 47.

FIG. 46. — Variations de la salinité, au cours du flot, au village de Penzé et à Penzornou, au mois de décembre 1939.

FIG. 47. — Répartition des salinités maxima et minima, au cours d'une marée, au mois de décembre 1939 (estuaire de la Penzé).

Le graphique des variations (fig. 46) n'est pas très différent de celui d'été et les remarques à faire sont identiques. Comme le débit fluvial est plus fort qu'en été, la brusque arrivée d'eau salée a lieu seulement 4 heures après la basse mer, tandis qu'en été elle avait lieu une heure plus tôt. D'autre part, toujours à cause du débit, le maximum atteint est moins élevé, l'amplitude de la variation est moins grande : elle n'est que de 25 ‰ pour le fond et de 12 ‰ en surface. Quant à la stratification densimétrique, elle est très nette dès qu'arrive l'onde de flot et elle est maximum à haute mer, avec 13 ‰ (valeur qui n'est pas plus grande qu'en été).

En résumé, au village de Penzé, les variations de salinité, en hiver, sont du même type que celles observées en été, mais le degré de salinité est moindre à haute mer par suite du plus grand débit fluvial.

2. *A la Pointe de Penzornou.* — Le 27 décembre 1939. Coefficient de marée : 100.

La pointe de Penzornou est située à environ 2 km. en aval du Pont de la Corde (mesures d'été), mais cependant les graphiques sont comparables.

Le maximum de salinité, au fond comme en surface, est nettement marin (35 ‰). Le minimum est par contre très différent : en surface, il est de 21 ‰ et au fond de 31 ‰.

La stratification densimétrique, constamment très nette au cours de la marée, est très marquée à basse mer où elle atteint 10 ‰. L'amplitude de la variation de salinité est grande : 14 ‰ pour la surface et 4,5 ‰ au fond. Ici encore, l'influence du plus fort débit fluvial est très nette.

Si l'on construit un graphique (fig. 47) représentant les salinités maxima et minima au fond et en surface, au village de Penzé et à Penzornou, on peut faire une remarque très curieuse, encore plus marquée que celle qui avait été faite en été : tandis que la stratification densimétrique est maximum à haute mer à Penzé, c'est à basse mer qu'elle est la plus grande à la Pointe de Penzornou et inversement. Ce curieux état de choses tient essentiellement aux conditions géographiques particulières qui conditionnent l'arrivée de l'onde de marée au village de Penzé.

V. LA SALINITÉ DES EAUX D'ESTUAIRE, EN HIVER, D'APRÈS LES RÉSULTATS DE DIFFÉRENTS CHERCHEURS (1). — TH. MONOD (1926) ne donne pas, dans son travail sur la basse Seulle, de résultats de mesures effectuées en hiver;

M. PRENANT et M. DUVAL (1926), qui ont effectué, le 27 novembre 1925, des mesures de salinité un peu en amont du Pont de la Corde, donnent pour les eaux de surface les résultats suivants :

Minimum : 20,6 ‰. Maximum : 32 ‰, soit une amplitude de 12 ‰.

Mes mesures confirment donc ces résultats (voir graphique de Penzornou).

Dans l'estuaire de la Tees (1931-1935), les résultats, publiés sous forme de courbes isohalines, indiquent une stratification densimétrique plus nette qu'en été, une moins grande extension vers l'amont des eaux salées et, d'une façon générale, un moins grand pourcentage d'eau de mer dans l'estuaire, à chaque instant de la marée (influence du débit fluvial).

Les mesures de E. FISCHER (1929), puis de P. CHAUCHARD (1939), dans l'estuaire de la Rance et dans la Rance canalisée, montrent, en hiver, des phénomènes analogues aux précédents : prépondérance de l'eau douce, stratification densimétrique très nette, etc...

### C. — SALINITÉS LE LONG DES RIVES

Quelques exemples seront suffisants pour indiquer les valeurs de la salinité le long des rives, comparées à celles du milieu. Les prélèvements ont été effectués du bord d'un canot et par une profondeur constamment comprise entre la surface et 0 m. 50 environ.

1. *Estuaire de l'Aulne (septembre 1938).* — Mesures effectuées pendant le flot.

On peut analyser ensemble les graphiques de Trégarvan et ceux de Dinéault (fig. 48 a et b). La salinité le long des rives est constamment moins élevée qu'au milieu de l'estuaire (surface ou fond), mais elle se rapproche davantage de celle de surface. Les

(1) Bien que les salinités des eaux des fjords ne soient pas ici prises en considération, il faut savoir cependant que l'on a signalé l'existence d'une couche d'eau douce glissant sans se mélanger (?) sur les eaux marines sous-jacentes. Mais, dans ce cas, le débit maximum d'eau douce a naturellement lieu au moment de la fonte des neiges et des glaces.

autres caractéristiques des graphiques (amplitudes des variations, maxima, minima, etc...) sont les mêmes que celles qui ont été précédemment notées.

## 2. Estuaire de l'Aulne (décembre 1938).

— Mesures effectuées en jusan, à Trégarvan seulement (fig. 49).

La salinité le long des rives est constam-

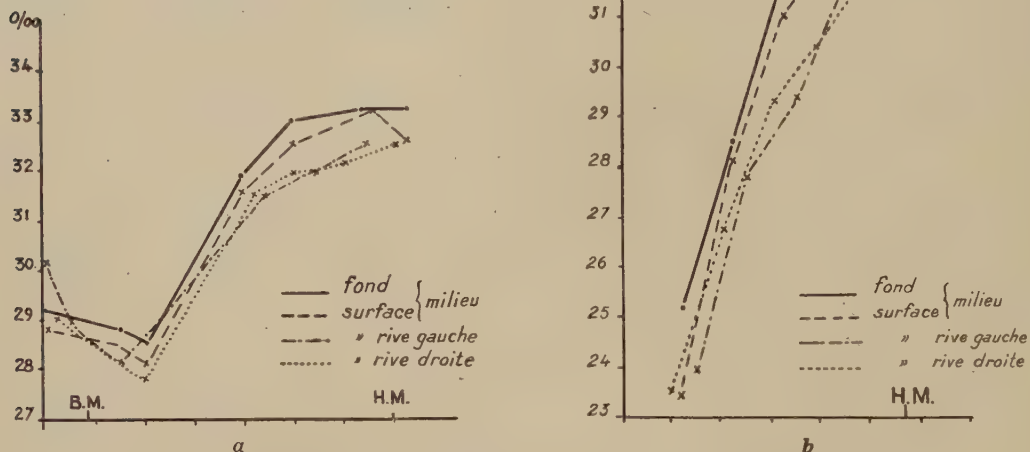


FIG. 48. — Variations de la salinité le long des rives de l'estuaire de l'Aulne, à Trégarvan (a) et à Dinéault (b), au cours de la marée (flot).

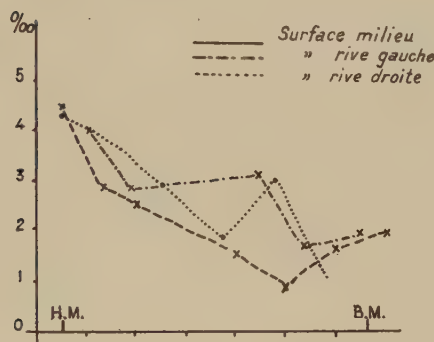


FIG. 49.

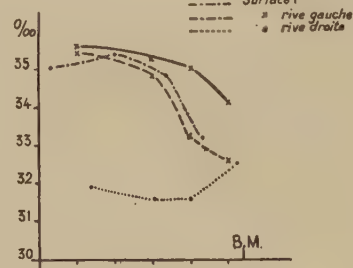


FIG. 50.

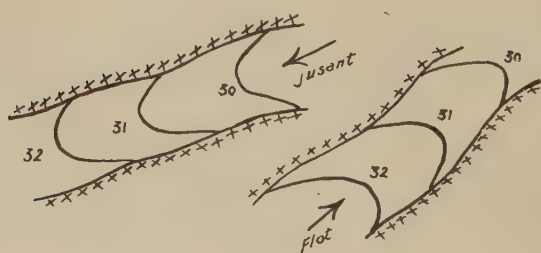


FIG. 51.

FIG. 49. — Variations de la salinité le long des rives de l'estuaire de l'Aulne, à Trégarvan, au cours de la marée (jusan).

FIG. 50. — Id., estuaire de la Penzé à Penzornou.

FIG. 51. — Répartitions schématisques de la salinité des couches superficielles dans un estuaire, en flot et en jusan.

ment plus élevée que celle des eaux de surface au milieu de l'estuaire. Mais, ici, il ressort que la salinité le long des rives se trouve être toujours du même ordre de grandeur

que celle de surface au milieu, tandis que, l'on s'en souvient, la salinité du fond est de beaucoup supérieure.

3. *Estuaire de la Penzé (août 1939)*. — Mesures effectuées en jusan, à Penzornou (fig. 50).

La salinité de l'eau le long de la rive gauche est toujours sensiblement plus forte que celle des eaux de surface au milieu. Par contre, le long de la rive droite, la salinité est remarquablement plus faible. Il semble que l'explication de cette anomalie doive être cherchée dans la topographie particulière de la rive — qui dessine une anse protégée par une pointe aval (pointe de Penzornou) et une pointe amont; — il peut, ainsi, s'isoler un certain volume d'eau qui ne participe pas, au même degré, à l'hydrodynamique (et par conséquent à la physicochimie) du reste des eaux de l'estuaire.

*En résumé*, la salinité le long des rives — sauf anomalies dues à des conditions topographiques particulières — est toujours très voisine de celle de surface au milieu. Il faut cependant noter : qu'en flot, elle a tendance à être toujours un peu plus faible (retard de propagation par freinage), tandis qu'en jusan, elle a tendance à être toujours un peu plus élevée (même raison). On peut donc schématiquement figurer de la manière suivante les isohalines de surface en plan (fig. 51).

#### D. — COMPARAISONS DES RÉGIMES DE SALINITÉ DANS LES ESTUAIRES AUX DIFFÉRENTES ÉPOQUES DE L'ANNÉE

A la suite de cet exposé de résultats, quelques remarques d'ordre général sont nécessaires.

Il apparaît que le régime des salinités, pour un estuaire, n'est pas le même, en été et en hiver. Été et hiver doivent être pris ici non dans le sens d'une saison (température), mais essentiellement dans le sens époque sèche, époque des pluies. Il se trouve que, dans le cas des estuaires étudiés (Bretagne, Maroc), l'époque des pluies a lieu en hiver, ce qui permet d'accepter les termes été et hiver pour désigner des régimes de pluies opposés. Car, comme cela ressort des graphiques et des résultats, c'est le débit fluvial qui conditionne essentiellement le régime des salinités.

En effet, le deuxième facteur de variation : le coefficient de marée, ne joue qu'un rôle de second ordre, du moins dans le temps, puisqu'il varie aussi bien en été qu'en hiver. On pourrait donc facilement le négliger en comparant des mesures effectuées en été et en hiver avec un même coefficient de marée.

D'ailleurs, quel que soit ce coefficient, il n'intervient, semble-t-il, que dans une très faible mesure pour modifier la répartition des salinités dans l'estuaire : son rôle a été très bien indiqué dans l'estuaire de la Tees, à l'aide de courbes isohalines (fig. 52) : elles n'ont pas leur allure modifiée, leur pente est sensiblement la même, mais l'eau salée pénètre simplement plus ou moins profondément en amont dans l'estuaire. On peut donc dire, d'une manière générale, qu'en un point d'observation de l'estuaire et à un instant donné de la marée, l'eau (au fond comme en surface) sera d'autant plus salée (flot) et d'autant moins salée (jusan) que le coefficient de marée sera plus élevé et, ceci,

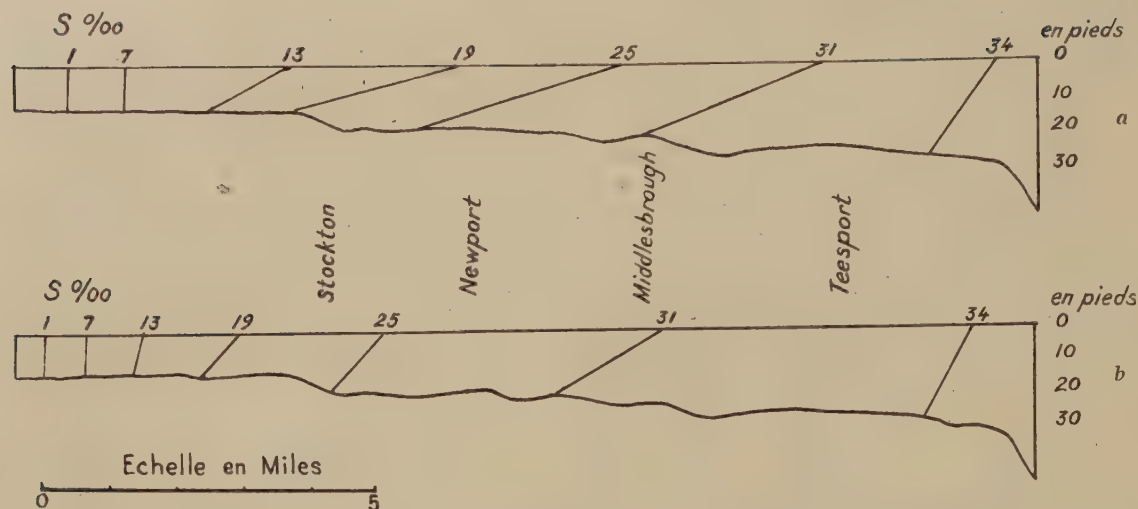


FIG. 52. — Estuaire de la Tees. Isohalines : a) faible coefficient; b) fort coefficient.

quel que soit le débit fluvial. Il est bien entendu que cette règle n'est valable qu'entre certaines limites, puisque à partir d'un certain point en amont, l'eau sera toujours douce et qu'à partir d'un autre point vers l'aval (en mer) l'eau aura toujours une salinité marine (35 ‰).

Si donc le coefficient de marée change peu la répartition des salinités, le débit fluvial la règle, par contre, entièrement.

Il est facile de résumer les principales caractéristiques des courbes de variations en été et en hiver.

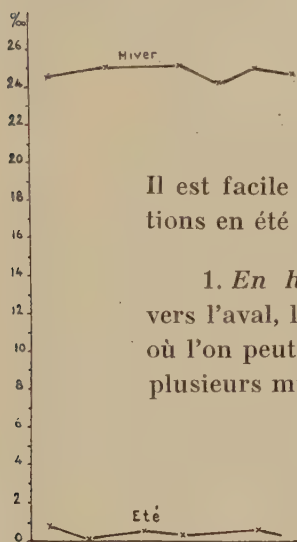


FIG. 53. — Graphique indiquant les différences de salinité (stratification) entre les eaux superficielles et les eaux du fond, en été (stratification insignifiante) et en hiver — au cours d'une marée —. Estuaire de l'Aulne (à Trégarvan).

1. *En hiver*, l'eau salée pénètre moins loin en amont qu'en été; par contre, vers l'aval, l'eau subit, en hiver, une dessalure plus grande et la zone marine où l'on peut retrouver l'influence des eaux douces est quelquefois importante : plusieurs milles (10), par exemple, dans le cas des oueds Sebou et Oum er Rbia.

Il est évident que si l'on étudie cette influence des eaux douces, aux embouchures des fleuves à très fort débit fluvial, comme le Congo, les phénomènes que j'ai étudiés semblent insignifiants. On a signalé en effet, à plusieurs reprises, qu'à plus de cent milles au large de l'embouchure du Congo, les eaux sont encore dessalées, du moins en surface.

2. *En été*, la majeure partie de l'estuaire, soumis aux variations de salinité, a des eaux assez identiques à la surface et au fond : la stratification par ordre de densité est faible; les isohalines sont très droites ou font un angle en tout cas supérieur à 45°. Il peut même arriver qu'il y ait des inversions : les eaux de surface étant plus salées (très faiblement d'ailleurs) que celles de profondeur. Par contre, en hiver, l'inclinaison des courbes est très grande (angle, parfois : 10°) et la stratification par ordre de densité est la règle générale (exemple typique de l'Aulne à Trégarvan, fig. 53).

3. *Les valeurs maxima de la salinité* s'observent, comme il est normal, toujours au voisinage de l'heure de haute mer, et *les valeurs minima* au voisinage de celle de basse mer. Près des embouchures, les minima et les maxima ont lieu à basse et haute mer; mais, à mesure que l'on va vers l'amont de l'estuaire, le minimum de salinité dure plus longtemps (quelques heures) et cela d'autant plus que le débit fluvial est plus fort.

4. *L'amplitude de la variation de salinité* est sensiblement la même au fond qu'en surface. Mais cette amplitude varie de l'aval en amont. A peu près nulle en mer, elle croît à mesure que l'on progresse vers l'amont de l'estuaire jusqu'à un maximum qui est fonction du débit et du coefficient de marée; après quoi, elle décroît et s'annule à partir du moment où les eaux sont constamment douces au cours de la marée.

L'exemple du Bou-Regreg est typique (16 septembre 1940) (fig. 35) : l'amplitude est nulle au large (indéterminée), de 9 ‰ à l'embouchure, de 10 ‰ à la Tour Hassan (2 km. en amont); elle passe à 16 ‰ à la Halte de Robinson (6 km. en amont), se maintient pendant quelques kilomètres à cette valeur, puis décroît pour n'être que de 11 ‰ à la Ferme Gibert (14 km. en amont), de 4 ‰ à l'oued Akrech (18 km. en amont) et s'annuler à la confluence de l'oued Grou (22 km. en amont). Ceci en régime d'étiage; en période de crues (hiver), cette courbe ne serait pas la même, mais l'allure serait identique.

*En résumé, le régime des salinités d'hiver s'oppose à celui d'été par un degré de salinité moins élevé en tous les points de l'estuaire et une stratification densimétrique beaucoup plus nette.*

### 3. — Essai d'interprétation des résultats.

#### A. — HIÉRARCHIE DES FACTEURS DE VARIATION

Les résultats qui viennent d'être exposés montrent suffisamment que, dans tout estuaire, la répartition et le régime des salinités est très variable. En un point, la salinité des eaux qui passent varie avec l'époque de l'année (débit fluvial), avec le jour (coefficient de marée), avec le temps (vents); de plus, elle varie avec l'heure de la marée et avec la profondeur. Il semble donc que l'on puisse établir une hiérarchie des facteurs de variation. Cette hiérarchie doit être basée non pas seulement sur l'importance du facteur à un moment donné, mais aussi sur sa durée dans le temps. Quelles que soient les conditions de débit et de marée, la salinité varie toujours avec la marée et augmente (sauf exceptions), avec la profondeur, pour un point d'observation situé, ni trop en amont, ni trop en aval.

Mais, par contre, l'écart de salinité observé au cours de la marée (que ce soit pour les eaux de surface ou de profondeur) est fonction des facteurs cités plus haut. Ceux-ci ont une périodicité plus ou moins longue et c'est elle qui conditionne finalement la répartition des salinités. Le débit fluvial est le facteur dont la période de variation est la plus longue (quelques mois habituellement), le coefficient de marée a une période plus courte, les conditions météorologiques (vents) sont tout à fait irrégulières et elles n'influencent la répartition des salinités qu'accidentellement, en empêchant, par exemple (vent contraire au courant de marée), la marée d'atteindre un niveau plus élevé.

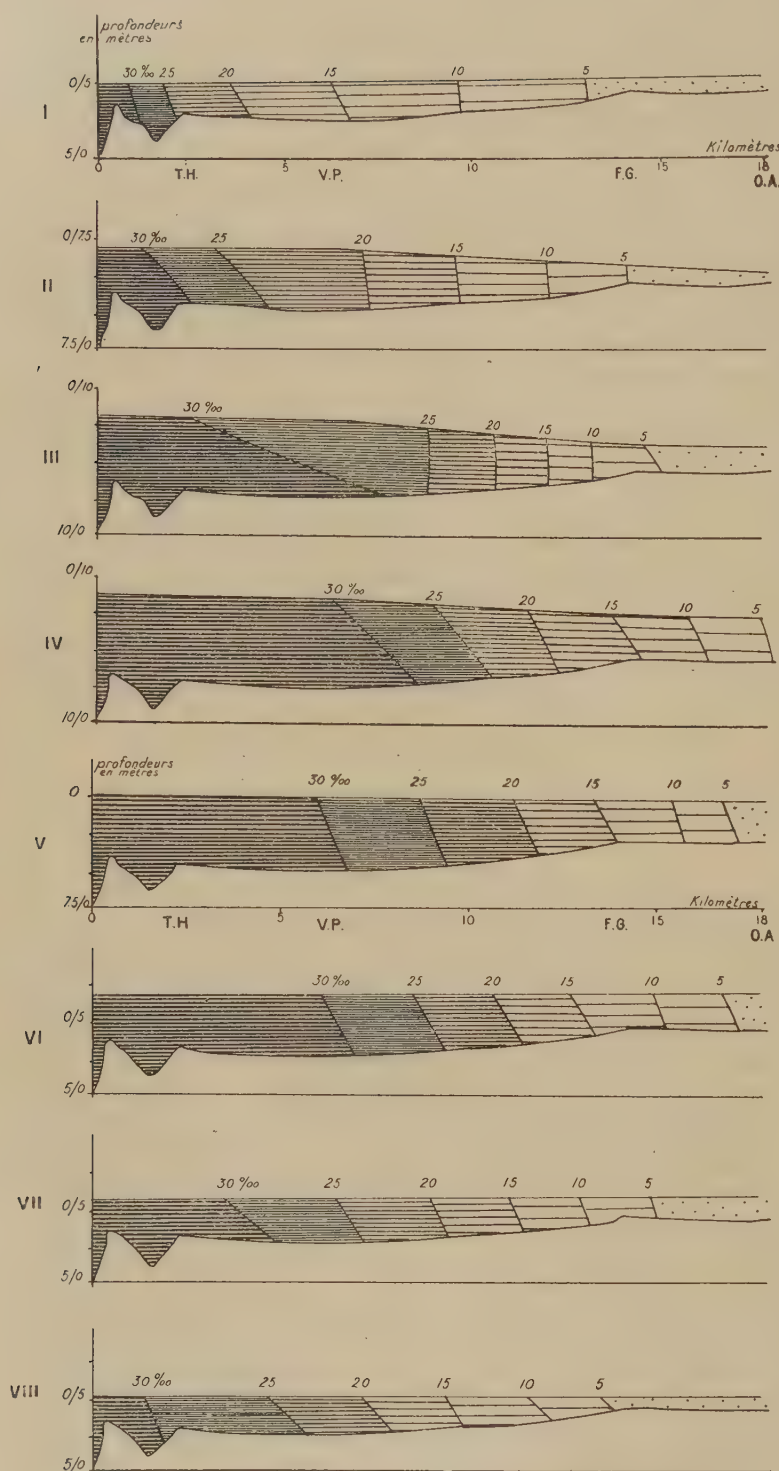


Fig. 54 a. — Isohalines de flot (I, II, III, IV) et isohalines de jusant (V, VI, VII, VIII) dans l'estuaire du Bou-Regreg, en période d'étiage (septembre 1940).

On voit donc que la salinité, mesurée en un point, à une certaine profondeur, à une certaine époque de l'année et, à une certaine heure de la journée, dépend de toute une série de facteurs. Mais l'intensité avec laquelle se font sentir ces facteurs dépend à son tour de la topographie de l'estuaire (forme des versants, pente du lit, dépôts, etc...). Il n'est donc pas possible *a priori*, même en connaissant toutes les données (valeur du débit fluvial, du coefficient de marée), de déterminer, sans observations, le degré de salinité ou mieux la répartition des salinités dans un estuaire. Ainsi rien ne laisse supposer, au premier abord, les étonnantes variations de salinités au Pont du village de Penzé, ou même la stratification par ordre de densité, si nette, au mois de décembre à Trégarvan.

#### B. — MÉCANISME DE PÉNÉTRATION DE L'EAU DE MER : MÉLANGE ET DIFFUSION

Jusqu'à présent, les graphiques des variations locales de salinité, ou ceux de sa répartition longitudinale, n'ont pas rendu compte exactement du mécanisme de pénétration de la marée de salinité dans un estuaire. Pour bien saisir ce phénomène, seule la repré-

sentation en courbes isohalines (en plan médio-sagittal) est convenable (1). Cette façon de faire, classique en océanographie, a été reprise par les chercheurs anglais pour l'estuaire de la Tees. Dans une figure donnée par L. GLANGEAUD (1938, 2) on voit ce mode de représentation utilisé occasionnellement pour l'estuaire de la Gironde. La même année, j'adoptais cette façon de procéder et donnais les isohalines maxima, en été, pour l'estuaire de l'Aulne (fig. 54 b). Puis les mesures plus nombreuses et simultanées, effectuées dans le Bou-Regreg, m'ont permis de construire les isohalines dans cet estuaire pour chaque heure de flot et chaque heure de jusant, mais seulement avec des débits fluviaux d'étiage. Il est tout à fait regrettable de ne pas avoir ces mêmes graphiques pour des débits fluviaux importants et même de crues. On se contentera ici des figures de la Tees (conditions d'hiver) et des mesures personnelles fragmentaires (Aulne, Penzé, Bou-Regreg [crues]).

De ces graphiques, il est possible de tirer quelques remarques :

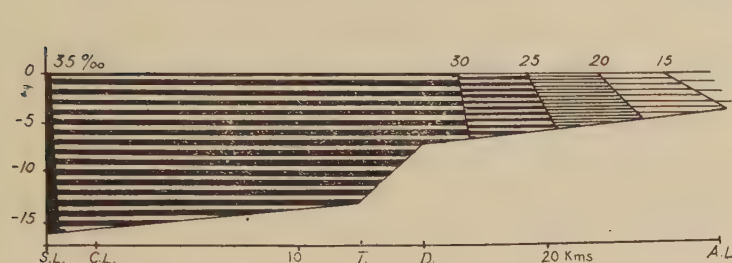


FIG. 54 b.

FIG. 54 b. — Isohalines maxima dans l'estuaire de l'Aulne en été (septembre 1938).

FIG. 55. — Isohalines des trois dernières heures de flot dans l'estuaire de la Penzé (décembre 1939).

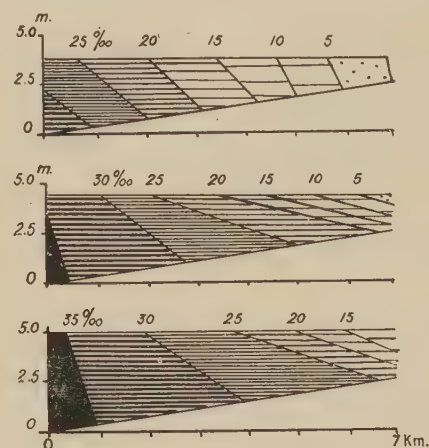


FIG. 55.

I. RÉGIME D'ÉTÉ OU D'ÉTIAGE (fig. 54 a). — 1. Il y a toujours dans l'estuaire (Bou-Regreg comme exemple) de l'eau dont la salinité décroît de l'aval à l'amont. Même à basse mer, cet état de chose subsiste, mais les salinités sont moins élevées.

2. Les isohalines ont une pente plus ou moins accentuée qui indique la plus ou moins grande stratification densimétrique. On voit donc que celle-ci n'est pas très grande (comme on le savait déjà par la considération des précédents graphiques).

3. Enfin, — et cela est capital ici, — on voit que la salinité (donc la proportion d'eau de mer) augmente beaucoup plus rapidement (en flot), au fond qu'en surface. Ceci vient corroborer entièrement ce que l'on avait déjà noté grâce aux mesures de courant.

En jusant (coefficient de marée moins élevé qu'en flot dans le cas du Bou-Regreg), les eaux se dessalent plus rapidement en surface qu'au fond. Cette dessalure est progres-

(1) Les courbes isohalines s'établissent en projetant sur le profil du lit de l'estuaire, et sur la trace de la surface de l'eau, les points espacés de 5 en 5 ‰ (ou plus rapprochés si l'on veut) des courbes de répartition longitudinale de la salinité.

sive et régulière tout le long de l'estuaire (pente sensiblement égale des isohalines pendant tout le jusan).

4. Il faut remarquer aussi que la salinité ne passe pas par de brusques discontinuités, mais qu'elle diminue progressivement d'aval en amont, comme si, seuls, jouaient les phénomènes de diffusion des sels de l'eau de mer dans l'eau douce fluviale.

II. RÉGIME D'HIVER OU DE CRUES. — 1. En se reportant aux isohalines de la Tess (fig. 52), ou même à celles de la Penzé (fig. 55), ce qui frappe au premier abord, c'est leur inclinaison beaucoup plus grande qu'en été, indiquant une stratification densimétrique très élevée.

2. D'une façon plus nette qu'en été, il apparaît que la marée de salinité commence par se faire sentir au fond avant qu'elle atteigne la surface (se reporter aussi au graphique de la variation de salinité au mois de décembre, à Trégarvan) (fig. 44).

*Gradient horizontal de salinité* (1). — On peut, dans une certaine mesure, tenter d'assimiler les courbes isohalines à des courbes hypsométriques ou à des isobares. Dans ces conditions, on peut définir un « gradient de salinité » équivalent de la pente ou du gradient de pression.

Le gradient de salinité sera la variation de salinité par unité de longueur comptée non pas suivant la normale aux isohalines, mais parallèlement à la surface du plan d'eau ou du lit :

$$Gs = \frac{S - S'}{l}$$

$S - S' =$  la différence de salinité (‰) qui sépare deux isohalines successives, et  $l =$  la distance qui les sépare (comptée en mètres). Pour que la valeur obtenue soit plus maniable, il vaut mieux multiplier par 100; on a alors l'expression :

$$Gs = \frac{S - S'}{l} 100.$$

Il semble que le gradient de salinité soit plus fort, en flot, en surface qu'au fond, et qu'en jusan, ce soit l'inverse qui se produise (Tees, Aulne, Penzé, certaines figures du Bou-Regreg).

Le gradient de salinité augmente d'aval en amont, au cours du flot dans l'estuaire de la Penzé. Ainsi dans cet estuaire, d'aval en amont, il passe successivement par les valeurs suivantes : 0,2; 0,17; 0,62; 1 (en fin de flot). Dans l'estuaire de l'Aulne, remarque identique et on note les valeurs croissantes : 0,033; 0,14; 0,14; 0,16.

Dans l'estuaire du Bou-Regreg,  $G_s$  ne croît pas régulièrement d'aval en amont, du moins en flot, et ses valeurs sont assez irrégulièrement réparties. Mais  $G_s$ , à l'éta de haute mer, croît d'aval en amont : 0,19; 0,20; 0,23; 0,27; 0,38; puis il prend des valeurs plus faibles avec le jusan, mais conserve tout de même des valeurs croissantes d'aval en amont : 0,125; 0,227; 0,250; 0,227; 0,280.

(1) Dans les recherches sur la Tees, le terme de gradient a été utilisé pour exprimer la plus ou moins grande stratification densimétrique (augmentation de la salinité avec la profondeur) : c'est le gradient vertical. Je ne l'ai pas utilisé ici, car je ne possédais pas suffisamment de mesures de salinité sur de mêmes verticales.

On pourrait donc représenter le phénomène de la pénétration de la marée dans l'estuaire, puis son évacuation, comme un phénomène de compression et de détente : les zones les plus en amont étant les plus comprimées en flot, puis se détendant avec le jusant.

Si l'on possédait des représentations isohalines pour plusieurs moments de la marée et pour de nombreux estuaires, la notion de gradient de salinité permettrait, mieux que toute autre considération, de faire des comparaisons.

Il serait nécessaire de multiplier en très grand nombre, les mesures de salinité, en surface et en profondeur tous les mètres, toutes les demi-heures, simultanément en plusieurs points de l'estuaire et pendant des marées complètes (flot et jusant). On pourrait alors établir des isohalines moins espacées (de 1 en 1 ‰, par exemple) et étudier, très en détail, la variation du gradient de salinité.

C'est peut être le moment de faire remarquer qu'en régime d'été et même d'hiver, l'eau douce n'atteint jamais la mer, mais qu'elle est mélangée à l'eau de mer dans des proportions toujours décroissantes vers l'embouchure, et que c'est sous forme d'eau saumâtre ou marine (légèrement dessalée), qu'elle est évacuée.

On se souvient qu'un calcul exécuté à partir des vitesses de courants de flot et de jusant (coefficient de marée élevé) avait permis, dans un chapitre précédent, de construire un graphique (fig. 16) représentant les trajectoires résultantes d'une particule en différents points du parcours de l'estuaire (Tees, dans le cas choisi). Si l'on s'y reporte maintenant, on peut constater que l'eau douce fluviale peut être évacuée en mer en deux marées, c'est-à-dire en 24 heures.

Avec des coefficients de marée moins élevés, cette évacuation sera plus lente (courants moins rapides); mais avec des débits fluviaux d'hiver (grandes vitesses de surface pendant des temps très longs), elle sera beaucoup plus rapide et vraisemblablement, en période de crues, un seul jusant doit suffire (exemple du Bou-Regreg, mesures du 28 octobre 1940).

Maintenant qu'on réalise la répartition des salinités dans l'ensemble d'un estuaire, il est possible de se demander par quels processus et à quels phénomènes elle est due.

Comme on vient de le voir tout au long de ce chapitre, et notamment par ces isohalines, il n'y a pas dans un estuaire, tout au moins en été et en règle générale, deux sortes d'eau en présence : eau douce et eau de mer. Mais de l'eau de mer pure (mettons à l'embouchure) à l'eau douce fluviale, la salinité décroît régulièrement. Il faut donc nécessairement qu'il y ait un mélange dynamique ou diffusion des sels de l'eau de mer dans l'eau douce.

Que sait-on sur la diffusion des sels de l'eau de mer dans l'eau douce ?

1. Le coefficient de diffusion du chlorure de sodium diminue à mesure que la concentration augmente (mais cette règle est sujette à des variations irrégulières (selon BURRAGE)).

2. Le coefficient de diffusion augmente avec l'accroissement de température et varie en sens inverse de la viscosité (THOVERT).

Par ailleurs, des expériences faites par THOULET (1891), sur la diffusion de l'eau douce dans l'eau de mer, ont montré qu'elle était excessivement lente, en milieu tran-

quille bien entendu. En milieu agité, il n'y a plus à proprement parler diffusion, mais mélange dynamique. Or, ne peut-on pas considérer un estuaire comme un flacon, dans lequel on'aurait placé au fond de l'eau salée et au-dessus de l'eau douce, que l'on agiterait d'une manière régulière en le penchant alternativement, comme l'on fait lorsque l'on désire mélanger deux liquides de densité différente placés dans un récipient fermé où il ne subsiste aucun espace libre. Si cette comparaison était rigoureuse, on trouverait au bout d'un certain temps, dans le flacon-estuaire, une eau à salinité inférieure à celle de l'eau de mer et homogène de haut en bas.

Mais la salinité n'est pas homogène d'un bout à l'autre de l'estuaire et ceci parce qu'il y a, d'une part, un apport constant d'eau douce, et d'autre part, un apport périodique d'eau salée.

Par ailleurs, l'eau de mer, dense, progresse en flot plus rapidement au fond qu'en surface; en jasant, c'est l'eau moins dense de surface qui circule le plus vite. Et il arrive que ce schéma soit encore accentué, c'est-à-dire que, pendant des temps plus ou moins longs, suivant le coefficient de marée et suivant le débit fluvial, il existe un courant dirigé vers l'amont au fond, et un autre dirigé vers l'aval en surface : on l'a vu, la conséquence est qu'à une certaine profondeur et sur une épaisseur plus ou moins grande, se crée une zone tourbillonnaire intense. C'est cette zone de tourbillons, de turbulence, qui est le facteur essentiel du mélange des eaux douces et des eaux salées. L'existence même de cette zone de discontinuité a été mise en évidence par la série de mesures effectuées à Trégarvan au mois de décembre 1938. A cette époque, la proportion d'eau fluviale était grande et la zone de mélange, intense au cours de la marée, s'était établie entre 3 et 5 m. de profondeur. Au-dessus et en-dessous, les eaux gardaient leur individualité presque rigoureuse.

En période d'étiage, cette zone de discontinuité doit remonter beaucoup plus près de la surface.

Il n'y a pas de doute que, par ailleurs, à ce mélange purement dynamique, se superposent des phénomènes de diffusion qui sont d'autant plus intenses que les surfaces en contact sont plus grandes (donc que l'agitation est plus grande, puisque celle-ci fragmente, pulvérise l'eau en sphères).

En été, la température étant plus élevée, la viscosité est d'autant plus faible et cet état physique vient favoriser encore : d'une part, la naissance de tourbillons et par conséquent l'existence d'une zone turbulente; d'autre part, le coefficient de diffusion qui croît avec la température. Ainsi, sans mettre en cause l'apport beaucoup plus faible d'eau douce, tout converge pour que la différence entre les eaux de fond et de surface soit beaucoup plus faible qu'en hiver.

L'étude du contact eau douce, eau de mer, dans ces estuaires, suggère à l'esprit l'image d'un front, tel que BJERKNES l'a décrit en météorologie. Le terme de front correspond dans ce cas à une surface de discontinuité entre une masse d'air chaud et une masse d'air froid. Si l'on transpose avec eau de mer et eau douce, on peut, en effet, assimiler, dans une certaine mesure, les phénomènes qui viennent d'être décrits avec ceux qui ont lieu aux alentours de la surface de discontinuité (front) de Bjerknes.

Il reste encore à expliquer la répartition des salinités en surface. On a vu qu'en flot elle était plus élevée au milieu que le long des rives, et qu'en jasant c'était l'inverse qui se produisait. Cette répartition est explicable lorsqu'on sait que le courant atteint sa plus grande vitesse au milieu, puisque sur les bords il est freiné par les rives et souvent par des

aspérités de la topographie, qui déterminent la formation de tourbillons à axes verticaux qui dégénèrent en turbulence et souvent en contre-courants, au moins sur une certaine distance.

Tel est grossièrement le régime des salinités dans un estuaire et une possibilité d'interprétation. Sans doute, n'est-ce là qu'une analyse très schématique d'une répartition encore mal connue, mais, pour le moment, il est difficile de pousser plus avant ces questions. Il faudrait pouvoir déterminer à chaque instant la position de la couche de discontinuité et par là même ses variations. Seules des mesures simultanées de salinité exécutées en très grand nombre, corrélativement avec des mesures de la vitesse du courant et si possible de la turbulence, pourraient donner une image exacte des phénomènes hydrodynamiques qui, comme on le voit, régissent en grande partie la physicochimie. Crédits, temps et personnel, collaboration du chimiste et de l'hydrodynamicien, tels sont les desiderata qui peuvent faire aboutir tout le programme de recherches qui s'impose. Le biologiste pourrait ensuite travailler sur des bases solides.

#### CHAPITRE IV. — LE pH

La concentration en ions hydrogène<sup>+</sup> ou pH (notation SORESENSEN) d'une solution peut se mesurer par une méthode électrique ou par une méthode colorimétrique. Sur le terrain ou en mer, la méthode colorimétrique offre des avantages considérables de mania-bilité. Le pH est obtenu à 0,1 près, pourvu que l'on se serve d'une gamme étalon assez serrée.

Dans l'estuaire du Bou-Regreg, les mesures ont été effectuées à l'aide d'une série de tubes scellés contenant les solutions (étalons de pH connu (Rhône-Poulenc), avec, comme indicateurs, le bleu de bromothymol et le rouge de phénol.

Dans l'estuaire de la Penzé et de la Loire, je me suis servi du colorimètre (comparateur Hellige) où les solutions étalons sont remplacées par des verres colorés inaltérables.

On sait que l'on doit effectuer une correction de salinité à toute mesure colorimétrique du pH de l'eau de mer. Des tables ont été établies à cet effet, car la correction à faire dépend essentiellement de l'indicateur choisi. Elles existent pour la phénolphthaléine et la naphtholphthaléine (PALITSCH, *in* LEGENDRE, 1925), pour le rouge de crésol et le rouge de phénol (RAMAGE et MILLER, 1925; puis MITCHELL, BUCH et RAKESTRAW, 1936). Mais elles manquent pour le bleu de bromothymol dont la zone de virage est comprise entre pH 6 et 7,6; ceci n'a d'ailleurs pas d'importance, puisque l'eau de mer a toujours un pH voisin de 8 et que, dans ce cas, on utilise de préférence le rouge de crésol dont les pH de virage sont respectivement à 7,2 et à 8,8.

Dans l'estuaire de la Penzé, le pH varie dans des limites assez grandes au cours de la marée; mais les pH inférieurs à 7,2 concernent toujours les eaux douces et la correction de salinité n'est donc pas à faire.

Les valeurs de pH qui sont indiquées dans ce travail sont donc des valeurs corrigées de l'erreur de sels (1).

I. VARIATIONS DU pH, LE 16 SEPTEMBRE 1940, A LA TOUR HASSAN, DANS L'ESTUAIRE DU BOU-REGREG. — Sur le graphique (fig. 56), qui représente les seules mesures effectuées

(1) Dans des notes antérieures à ce travail, j'ai déjà fourni des valeurs de pH mesurées dans l'estuaire de la Penzé et du Bou-Regreg, mais sans que la correction de salinité ait été effectuée : c'est pourquoi les résultats qui sont exposés ici pourraient sembler différents.

dans cet estuaire, il apparaît que le pH demeure toujours alcalin au cours de la marée. Il augmente à mesure que croît la proportion d'eau de mer, et sa valeur maxima de 7,84 correspond au maximum de salinité; mais l'accroissement du pH est lié aussi à l'activité photosynthétique du plancton végétal : en effet, avec la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon (éclairage), la teneur en gaz carbonique dissous doit diminuer et le pH doit donc augmenter, mais ce facteur de variation est difficilement décelable.

Il faut toutefois noter que la valeur maxima du pH est cependant inférieure à celle de l'eau de mer le long du littoral marocain, où il est égal à 8,2, comme j'ai pu le constater quelques jours après ces mesures.

## II. VARIATIONS DU pH DANS L'ESTUAIRE DE LA PENZÉ :

1. *Au village de Penzé.* — A. *Août 1939 et septembre 1941* (fig. 57) : Quand coule l'eau douce, le pH ne varie que peu ou pas du tout; il est légèrement alcalin : 7,4; mais il

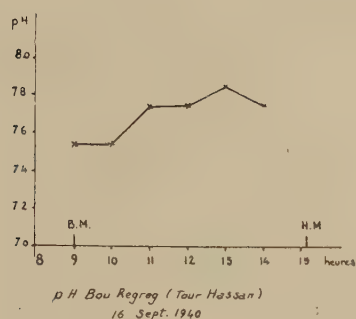


FIG. 56.

FIG. 56. — Variations du pH des eaux de surface, au cours du flot, à la Tour Hassan (estuaire du Bou-Regreg), au mois de septembre 1940.

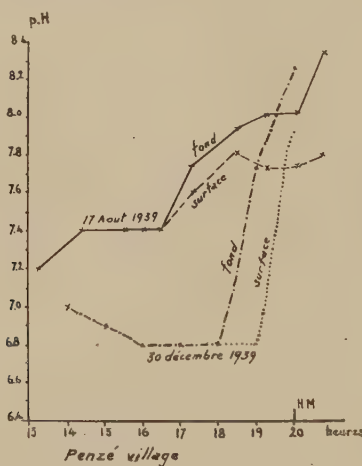


FIG. 57.

FIG. 57. — Variations du pH, au cours du flot, au village de Penzé (estuaire de la Penzé) en août et décembre 1939.

augmente très brusquement (comme la salinité) lorsqu'arrive l'onde de flot. Dès lors, il croît à mesure que la salinité augmente, pour atteindre à haute mer la valeur maxima de 7,8 en surface et de 8,33 au fond (août 1939), et de 8,23 en surface et 8,34 au fond (septembre 1941) (voir tableau p. 223).

B. *Décembre 1939* (fig. 57) : En hiver, les variations du pH sont du même type qu'en été, mais elles sont encore plus brusques. Les eaux douces fluviales sont lé-

gèrement acides, ce qui peut s'expliquer : d'une part, par les pluies plus abondantes et donc un ruissellement plus intense sur les sols acides du bassin versant; d'autre part, par une activité photosynthétique moins forte en hiver qu'en été et donc une moindre consommation de  $\text{CO}_2$  dissous.

Aussi bien en hiver qu'en été, on s'aperçoit que, dès que la hauteur d'eau est suffisante pour faire des mesures, c'est-à-dire dès que l'onde de flot arrive au village de Penzé, le pH des eaux de surface est toujours inférieur à celui des eaux de fond. Les mesures du pH confirment donc celles de salinité et de température en ce même lieu.

2. *Au Pont de la Corde et à Penzornou.* — A. *Août 1939 et septembre 1941* : Le pH est toujours alcalin et parfois très voisin de celui de l'eau de mer, mais aucune variation

| Heures de la marée            | Village de Penzé |      |               |      |                |      | Pont de la Corde |      |
|-------------------------------|------------------|------|---------------|------|----------------|------|------------------|------|
|                               | Août 1939        |      | Décembre 1939 |      | Septembre 1941 |      | Septembre 1939   |      |
|                               | S ‰              | pH   | S ‰           | pH   | S ‰            | pH   | S ‰              | pH   |
| 1 h. av. B. M....             | < 1              | 7,2  | —             | —    | —              | —    | —                | —    |
|                               | —                | 7,2  | —             | —    | —              | —    | —                | —    |
| 6 h. av. H. M. (= B. M.)..... | < 1              | 7,4  | 0,3           | 7    | 0,58           | 7,4  | 25,83            | 7,75 |
|                               | —                | 7,4  | —             | —    | —              | —    | —                | —    |
| 5 h. av. H. M....             | < 1              | 7,4  | 0,3           | 6,9  | 0,58           | 7,4  | 24,45            | 7,75 |
|                               | —                | 7,4  | —             | —    | —              | —    | —                | —    |
| 4 h. » ....                   | 1,5              | 7,6  | 0,3           | 6,8  | 0,58           | 7,6  | 29,44            | 7,54 |
|                               | 23,6             | 7,74 | 0,3           | 6,8  | —              | —    | —                | —    |
| 3 h. » ....                   | 1,6              | 7,8  | 0,3           | 6,8  | 0,86           | 7,8  | 33,33            | 7,93 |
|                               | 31,11            | 7,94 | 0,3           | 6,8  | 23             | 8,14 | 32,77            | 8,14 |
| 2 h. » ...                    | 19,42            | 7,73 | 0,3           | 6,8  | 13,9           | 8,22 | 34,16            | 7,93 |
|                               | 31,62            | 8,04 | 0,3           | 6,8  | 28,33          | 8,34 | 34,99            | 7,73 |
| 1 h. » ....                   | 23,03            | 7,74 | 1,44          | 6,8  | 10,57          | 8,23 | 34,16            | 7,73 |
|                               | 31,86            | 8,04 | 19,44         | 7,73 | 30             | 8,34 | 34,16            | 7,93 |
| 0 h. av. H. M...              | 16,81            | 7,79 | 12,24         | 7,92 | 13,9           | 8,22 | 34,16            | 8,13 |
|                               | 32,36            | 8,33 | 24,99         | 8,25 | 30,83          | 8,14 | —                | —    |

| Heures de la marée           | Penzornou |      |               |      | Roscoff   |      |
|------------------------------|-----------|------|---------------|------|-----------|------|
|                              | Août 1939 |      | Décembre 1939 |      | Août 1941 |      |
|                              | S ‰       | pH   | S ‰           | pH   | S ‰       | pH   |
| 1 h. av. B. M.....           | —         | —    | —             | —    | 35,2      | 7,73 |
|                              | —         | —    | —             | —    | —         | —    |
| 6 h. av. H. M. (= B. M.).... | 32,61     | 8,14 | —             | —    | —         | —    |
|                              | 34,10     | 7,93 | —             | —    | —         | —    |
| 5 h. av. H. M.....           | 33,32     | 8,13 | 21,12         | 7,73 | 35,7      | 8,13 |
|                              | 35,09     | 8,13 | 31,11         | 7,74 | —         | —    |
| 4 h. » .....                 | 34,85     | 8,13 | 22,50         | 7,74 | —         | —    |
|                              | 35,34     | 8,13 | 33,03         | 7,73 | —         | —    |
| 3 h. » .....                 | —         | —    | 27,21         | 7,74 | 35,4      | 8,13 |
|                              | —         | —    | 34,71         | 7,73 | —         | —    |
| 2 h. » .....                 | 35,46     | 7,83 | 35,44         | 7,73 | —         | —    |
|                              | 35,59     | 8,03 | 35,25         | 7,73 | —         | —    |
| 1 h. » .....                 | —         | —    | 35,55         | 7,73 | 35,8      | 8,13 |
|                              | —         | —    | 35,82         | 7,73 | —         | —    |
| 0 h. av. H. M.....           | —         | —    | —             | —    | —         | —    |
|                              | —         | —    | —             | —    | —         | —    |

régulière n'apparaît; d'autre part, le pH est tantôt plus élevé en surface qu'au fond, tantôt c'est l'inverse qui se produit.

B. *Décembre 1939* : Là aussi, aucune variation de pH n'est visible : il demeure même remarquablement constant à 7,73.

3. *Anse du Vieux-Moulin*. — *Août 1941* : Mesures effectuées à 13 heures (au soleil), à l'étales de haute mer :

|                                             |           |
|---------------------------------------------|-----------|
| Petit affluent de la Penzé (eau douce)..... | pH : 7,2  |
| Eau saumâtre (S. = 1,41 ‰).....             | pH : 7,6  |
| Eau de l'estuaire (S. = 29,44 ‰).....       | pH : 7,94 |

Ces trois mesures effectuées à une distance de 100 m. l'une de l'autre montrent, avec les résultats précédents, que les eaux de l'estuaire de la Penzé ont un pH nettement plus élevé que celui de l'eau douce à mesure que l'on s'approche de l'embouchure, ou mieux que la proportion d'eau marine est plus élevée.

### III. VARIATIONS DU pH DANS L'ESTUAIRE DE LA LOIRE :

1. *Nantes-Chantenay*. — 4 juin 1942 : Le pH demeure sensiblement constant à 7,6 entre 5 h. 30 du matin et 18 heures.

2. *La Maréchale*. — 2 juin 1942 : On observe un pH minimum à 7,6, vers 8 h. 30, et un pH maximum à 8,1, à 15 h. 30 et 16 h. 30. — 4 juin 1942 : Le pH varie d'une façon très irrégulière entre 7,9 et 8,1.

3. *Saint-Nazaire*. — 2 juin 1942 : pH à peu près constant entre 7,9 et 8. — 28 juin 1942 : pH constant à 8.

Toutes ces valeurs de pH sont approchées et ne doivent être considérées que comme des ordres de grandeur. Il faut dire aussi que, d'une façon générale, on ne saisit pas de variation nette du pH en fonction de la marée ou de l'heure d'observation. Toutefois peut-on souligner que le pH, à Nantes-Chantenay (eau toujours douce), est moins alcalin que plus en aval.

IV. VARIATIONS DU pH DANS L'ESTUAIRE DE LA TEES. — Les déterminations du pH des eaux de cet estuaire sont peu nombreuses. Elles n'indiquent pas de variation régulière avec la marée, puisque, de pH = 8 avec les eaux douces, on passe à pH = 7,3 avec les eaux à S. = 20-25 ‰, et à pH = 7,9 avec les eaux à S. = 27,5 ‰. La zone de pH minimum avec les eaux saumâtres correspondrait, d'après les auteurs anglais, à un abaissement du pH normal de l'eau, par suite de la décharge, dans l'estuaire, d'eaux d'usine contenant de l'acide chlorhydrique.

V. VARIATIONS DU pH DANS L'ESTUAIRE DE LA RANCE. — Les mesures effectuées par E. FISCHER-PIETTE, puis par P. CHAUCHARD, montrent le pH des eaux de l'estuaire de la Rance très variable et souvent différent de celui de l'eau de mer. D'après P. CHAUCHARD, le pH est, en été, compris en général entre 7,1 et 7,4, mais pouvant atteindre 8 et même 8,3. Au printemps, et surtout en hiver, ces valeurs s'abaissent nettement et parfois même il peut être acide : pH = 6,6.

En règle générale, les eaux de l'estuaire seraient toujours moins alcalines que l'eau de mer et, d'autre part, le pH variant dans le même sens que la teneur en oxygène, il semble que l'activité photosynthétique joue un rôle non négligeable.

VI. VARIATIONS DU pH DE L'EAU DE MER. — Il ne s'agit pas ici d'exposer les recherches et mesures très nombreuses qui ont été effectuées en mer, ce qui d'ailleurs a déjà été fait par R. LEGENDRE (1925, 1937). Cependant, il est intéressant de savoir de quelle manière varie le pH des eaux littorales en fonction de la marée et en fonction de la hauteur du soleil. Les principales observations de ce genre sont dues à W. R. G. ATKINS (1922-1924), J. F. Mac CLENDON (1917) et R. LEGENDRE (1922). Ce dernier a observé qu'à Concarneau,

au cours de la journée, le pH augmentait sensiblement : de  $\text{pH} = 8$  à 8 heures du matin, il atteint 8,19 entre 14 et 15 heures, pour diminuer ensuite jusqu'à 8,01 à 19 heures. Cette variation est liée à la teneur en oxygène (voir chap. V), qui varie dans le même sens. Il est donc évident que l'augmentation du pH est liée à la plus ou moins grande quantité de gaz carbonique dissous, c'est-à-dire à l'activité photosynthétique et, en dernière analyse, à la plus ou moins grande densité du plancton et du peuplement algologique local.

Les quelques mesures faites à Roscoff et figurées dans le tableau précédent montrent une variation semblable du pH de l'eau de mer littorale dans cette région.

Le pH des eaux littorales varie avec la saison : ainsi, selon ATKINS, il est minimum en hiver (mois de décembre) et maximum au printemps (mai-juin), variant en fonction de l'abondance du plancton et notamment des algues (Diatomées).

VII. DISTRIBUTION GÉNÉRALE DU pH DANS UN ESTUAIRE. — On ne possède pas un nombre de mesures suffisamment élevé pour interpréter correctement les résultats, mais on peut noter cependant :

1. Qu'en un point de l'estuaire (le phénomène est net au village de Penzé et à la Tour Hassan), le pH augmente avec le flot. La valeur maximum de pH correspond habituellement à la valeur maximum de salinité.

2. Que le pH est plus alcalin en été (et au printemps) qu'en hiver (et en automne) : observations au village de Penzé, et de P. CHAUCHARD dans la Rance, ce qui s'explique par une température générale de l'eau plus basse (tension de saturation du  $\text{CO}_2$  plus élevée), par le ruissellement plus intense sur les sols (pluies, crues), par l'activité photosynthétique du plancton végétal très ralentie.

3. Que lorsqu'il y a nette stratification densimétrique des eaux (Penzé), le pH des eaux de fond est plus élevé que celui des eaux de surface. Mais, normalement, si les eaux étaient homogènes, c'est l'inverse qui devrait avoir lieu par suite de l'activité photosynthétique du plancton végétal en surface.

4. Que, d'une façon générale, le pH augmente d'amont en aval, à mesure que la proportion d'eau marine est plus grande.

#### CHAPITRE V. — TENEUR EN OXYGÈNE DISSOUS

Depuis longtemps, les océanographes dosent les gaz dissous dans l'eau de mer. Les gaz habituellement dosés sont l'oxygène et le gaz carbonique. Mais, plus couramment encore, on ne dose que l'oxygène dont la technique de dosage est très commode à utiliser en mer, ou sur le terrain, depuis que M. NICLOUX (1930) a modifié celle, classique, de WINKLER (1921). Pour le gaz carbonique, on ne possède pas de technique aussi sûre, ni aussi commode, et, le plus souvent, on se contente de faire une mesure de pH et, à la rigueur, de « réserve alcaline ».

\*  
\*\*

Il n'y a pas que le biologiste qui ait intérêt à connaître la teneur en oxygène dissous dans l'eau. Depuis que DEFANT et WUST, après la campagne du *Meteor* dans l'Océan Atlantique, ont montré qu'il existe des zones à déficience d'oxygène et que ces zones

peuvent être prises pour limites de séparation entre une troposphère et stratosphère océanique, on sait que le dosage de l'oxygène a un intérêt physique et même mécanique.

Je n'ai pu effectuer qu'un petit nombre de dosages, et seulement dans l'estuaire de la Penzé, au mois de septembre 1941, auxquels je peux ajouter ceux que j'ai organisés et contrôlés dans l'estuaire de la Loire.

On sait que la teneur en gaz dissous, en général, et celle en oxygène, en particulier, décroît quand la température et la salinité de l'eau augmentent. Si donc, dans un estuaire, il existe une variation journalière de la teneur en oxygène indépendante de la température et de la salinité, il faut, dans l'expression des résultats, éliminer ces deux facteurs. C. J. Fox a publié (1907) des tables donnant le nombre de centimètres cubes d'oxygène qui est dissous à saturation dans 1.000 cc. d'eau, calculé pour tous les degrés de température et tous ceux de salinité (exprimée en chlore). Possédant la teneur en oxygène d'un échantillon, la température et la salinité, il est donc facile d'exprimer la teneur en oxygène en % de la saturation, et on élimine du même coup température et salinité, comme facteurs de variation.

Il est inutile de dire que le dosage doit être effectué immédiatement après la prise de l'échantillon, tout retard pouvant amener une variation de la teneur en oxygène (activité biologique).

### 1. — L'oxygène dissous dans les eaux de l'estuaire de la Penzé.

1. VILLAGE DE PENZÉ. — 21 septembre 1941 : Débit fluvial très faible, fort coefficient de marée (100). En surface : la teneur en oxygène dissous reste élevée (10 mgr.-l.) tant que coule de l'eau douce fluviale froide (14°), puis elle diminue brusquement avec l'arrivée des eaux salées plus chaudes (18°).

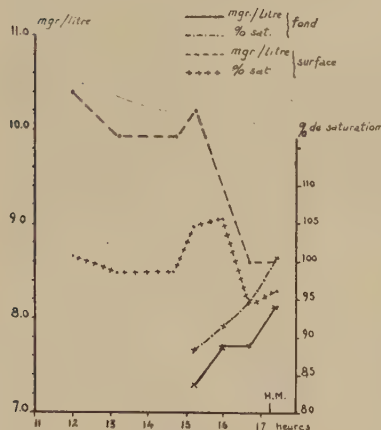


FIG. 58.

FIG. 58. — Variations de la teneur en oxygène dissous au village de Penzé (septembre 1941), au cours du flot.

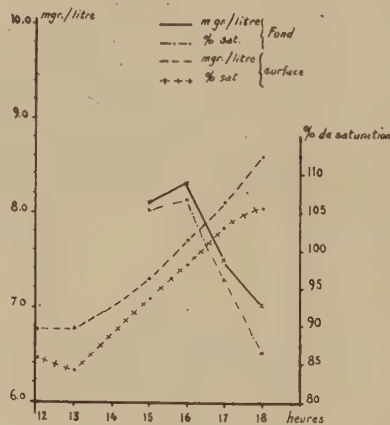


FIG. 59.

FIG. 59. — Variations de la teneur en oxygène dissous au Pont de la Corde (septembre 1941), au cours du flot.

Si on examine la courbe (fig. 58) donnant la valeur de l'oxygène dissous par rapport à la saturation, on s'aperçoit que l'eau douce est toujours très voisine de la saturation (mais cependant plutôt sous-saturée), puis que l'eau saumâtre, qui arrive très brusquement au Pont de Penzé, est sursaturée (105 %), et finalement qu'au voisinage de l'étape de haute mer (eau à S. = 15 ‰) il y a de nouveau sous-saturation.

Au fond (on sait que la hauteur d'eau est insuffisante pour effectuer des prélèvements avant que le flot commence à se faire sentir) : la teneur en oxygène augmente avec la plus grande proportion d'eau de mer. La courbe de saturation indique une sous-saturation jusqu'à la dernière mesure où la saturation est juste atteinte (100 %).

On notera également : que la teneur en oxygène dissous est constamment plus élevée en surface qu'au fond.

En se plaçant du point de vue de l'heure (hauteur du soleil au-dessus de l'horizon), il me semble très difficile de tirer une conclusion de ce graphique, l'augmentation de teneur en oxygène dissous, due à la photosynthèse, en ce point, devant être complètement masquée par l'arrivée brusque des eaux saumâtres et marines dont la teneur en oxygène est spécifiquement différente de celle de l'eau douce.

2. PONT DE LA CORDE. — 22 septembre 1941 (fig. 59) : Débit fluvial très faible, fort coefficient de marée (103). La teneur en oxygène dissous croît en surface avec la pénétration des eaux plus salées, d'une part, et avec l'heure d'observation, en sorte qu'il est difficile de saisir la cause exacte de cette augmentation régulière. Je croirai plus volontiers que c'est l'action de la photosynthèse qui est dominante, car au fond, où les eaux salées ont le plus d'influence, la teneur en oxygène diminue avec l'heure de la marée.

Les eaux de surface sont, presque pendant toute la marée, sous-saturées en oxygène, la saturation et la sur-saturation n'étant atteintes qu'en fin de marée (103 et 106 %). Les eaux du fond au contraire, légèrement sur-saturées à mi-marée (105-107 %), sont nettement sous-saturées à la haute mer.

N.-B. — Dans le tracé des courbes de surface, j'ai négligé la mesure faite à 14 heures, parce qu'elle me semble représenter une anomalie qui n'est guère explicable (erreur de dosage ?).

En comparant les graphiques de Penzé et du Pont de la Corde, on est frappé par leur opposition : tandis qu'à Penzé, la teneur en oxygène décroît en surface, avec l'heure et avec la marée, c'est l'inverse qui se produit au Pont de la Corde; au fond, on fait des constatations du même ordre, mais inversées. Que peut-on en conclure ? pas grand chose pour le moment, à mon avis. Il est préférable, auparavant, de se rendre compte des résultats qui ont été acquis sur d'autres estuaires.

## 2. — L'oxygène dissous dans les eaux de l'estuaire de la Loire.

Quelques mesures ont été effectuées au cours de la marée, en surface et au fond :

| Heures     | La Maréchale :<br>2 juin 1942. Coefficient de marée : 97. Eau douce |                   |      |                 |        |
|------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|------|-----------------|--------|
|            | Températures                                                        | Oxygène ; mgr.-l. |      | % de saturation |        |
|            |                                                                     | Surface           | Fond | Surface         | Fond   |
| 5 30.....  | 16°5                                                                | 8,8               | 9,9  | 88              | 99     |
| 6 .....    | 16°5                                                                | 8,2               | 10,5 | 82              | 105    |
| 6 30.....  | 17°                                                                 | 8,2               | 8,8  | 82,7            | 88,79  |
| 9 .....    | 17°5                                                                | 8,8               | 9,9  | 89,5            | 100,7  |
| 10 .....   | 18°                                                                 | 7,7               | 9,3  | 79,07           | 95,5   |
| 10 30..... | 18°                                                                 | 9,3               | 9,3  | 95,5            | 95,5   |
| 11 30..... | 18°                                                                 | 8,8               | 9,3  | 90,37           | 95,5   |
| 12 .....   | 18°                                                                 | 9,9               | 9,9  | 101,6           | 101,6  |
| 12 30..... | 18°5                                                                | 8,2               | 9,9  | 85,03           | 102,66 |
| 13 .....   | 18°5                                                                | 8,8               | 9,9  | 91,25           | 102,66 |
| 13 30..... | 19°                                                                 | 8,8               | 9,4  | 92,13           | 98,41  |
| 14 .....   | 19°                                                                 | 8,8               | 9,9  | 92,13           | 93,65  |
| 14 30..... | 10°5                                                                | 9,                | 9,6  | 95,22           | 101,56 |
| 15 30..... | 19°                                                                 | 9,4               | 9,4  | 98,41           | 98,41  |

| Heures     | Saint-Nazaire<br>28 juin 1942. Coeff. de marée : 100 |      |                |      |                 |      |                 |      |
|------------|------------------------------------------------------|------|----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
|            | Températures                                         |      | Salinités (Cl) |      | Oxygène mgr.-l. |      | % de saturation |      |
|            | Surface                                              | Fond | Surface        | Fond | Surface         | Fond | Surface         | Fond |
| 5 30.....  | 17°                                                  | 16°  | 14             | 17,6 | 7,6             | 7,6  | 88,7            | 91   |
| 6 30.....  | 18°                                                  | 17°  | 11,5           | 15,7 | 7,1             | 7,1  | 82,1            | 84,5 |
| 7 30.....  | 19°                                                  | 17°5 | 9,7            | 13,6 | 7,3             | 8,2  | 84,1            | 96,1 |
| 8 30.....  | 20°                                                  | 19°  | 7,2            | 10   | 7               | 7,8  | 80              | 90,2 |
| 9 30.....  | 20°5                                                 | 20°  | 5,4            | 7,2  | 6,6             | 6    | 75              | 68,5 |
| 10 30..... | 21°5                                                 | 20°  | 3,6            | 6    | 6,6             | 6    | 74,8            | 67,8 |
| 11 .....   | 21°5                                                 | 20°  | 3,3            | 7,2  | 6               | 5,5  | 67,6            | 62,8 |
| 11 30..... | 21°5                                                 | 20°  | 5,4            | 8,4  | 6,6             | 6,6  | 75,3            | 76,3 |
| 12 30..... | 19°5                                                 | 19°5 | 9,1            | 9,7  | 6,6             | 6,6  | 76,3            | 76,6 |
| 13 .....   | 18°5                                                 | 18°5 | 10,9           | 12,1 | 6,6             | 6    | 76,6            | 69,6 |
| 13 30..... | 17°5                                                 | 17°5 | 13             | 14,8 | 6,6             | 6    | 76,8            | 71,1 |
| 14 30..... | 17°5                                                 | 16°8 | 15,1           | 17,7 | 6,6             | 7,1  | 77,8            | 86,1 |
| 15 30..... | 17°                                                  | 16°5 | 16,3           | 18,2 | 6,6             | 7    | 79              | 83,6 |

Que peut-on conclure de ces tableaux ?

1° A la Maréchale, où l'eau est toujours douce, il est visible que la teneur en oxygène est constamment plus élevée au fond qu'en surface. La saturation est parfois atteinte, mais d'une façon très irrégulière. On n'observe aucune variation nette de la teneur en oxygène avec la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, mais cependant la tension de saturation semble plus élevée dans l'après-midi que dans la matinée.

2° A Saint-Nazaire, la variation de teneur en oxygène est encore plus confuse : on peut noter que la saturation n'est jamais atteinte; par ailleurs, c'est tantôt l'eau de surface, tantôt l'eau du fond qui contient le plus d'oxygène; aucune liaison avec l'éclairement ou l'insolation ni avec la marée n'est observable.

3° La comparaison des mesures effectuées à Saint-Nazaire et à la Maréchale permet tout de même de remarquer que la teneur en oxygène est plus élevée en moyenne à la Maréchale qu'à Saint-Nazaire. Encore ne faut-il pas trop s'attacher à cette conclusion, car les mesures n'ont pas été effectuées le même jour.

### 3. — L'oxygène dissous dans les eaux de l'estuaire de la Tees.

Les résultats obtenus (fig. 60) dans cet estuaire peuvent être ainsi résumés :

Les eaux douces fluviales et les eaux marines (embouchure) ont une teneur en oxygène (exprimée en % de saturation) élevée (80-90 %).

*Les eaux saumâtres de l'estuaire proprement dit ont une teneur en oxygène beaucoup plus faible (< 50 %).* Cette zone de moindre saturation est tantôt vers l'aval (basse mer), tantôt en amont (haute mer).

Des graphiques donnés et des précédents résultats, on conclut que dans la zone amont de l'estuaire, la teneur en oxygène dissous diminue avec la marée (flot) et qu'au contraire, dans la zone aval, elle augmente avec la marée. En effet, dans le premier cas, les eaux douces oxygénées sont remplacées par les eaux saumâtres qui le sont beaucoup moins dans le second, les eaux saumâtres sont repoussées et remplacées par les eaux marines plus oxygénées.

La teneur en oxygène est plus élevée près du fond qu'en surface, parfois, c'est l'inverse qui se produit. D'après les auteurs, il n'y a pas de règle générale; mais, d'après les gra-

phiques qu'ils produisent (courbes d'égale saturation en coupe sagittale), il apparaît qu'à haute mer et à basse mer, la teneur en oxygène est plus élevée près du fond qu'en surface.

La conclusion générale, selon les auteurs, est la suivante : la variation de la teneur en oxygène des eaux de l'estuaire de la Tees serait essentiellement fonction de la température. Celle-ci, en effet, quand elle est élevée, est favorable au métabolisme des bactéries qui ont besoin d'oxygène pour attaquer et détruire les produits ou matières nocives amenées par les égouts et les déversements d'usine ; l'oxygène ainsi consommé ne serait

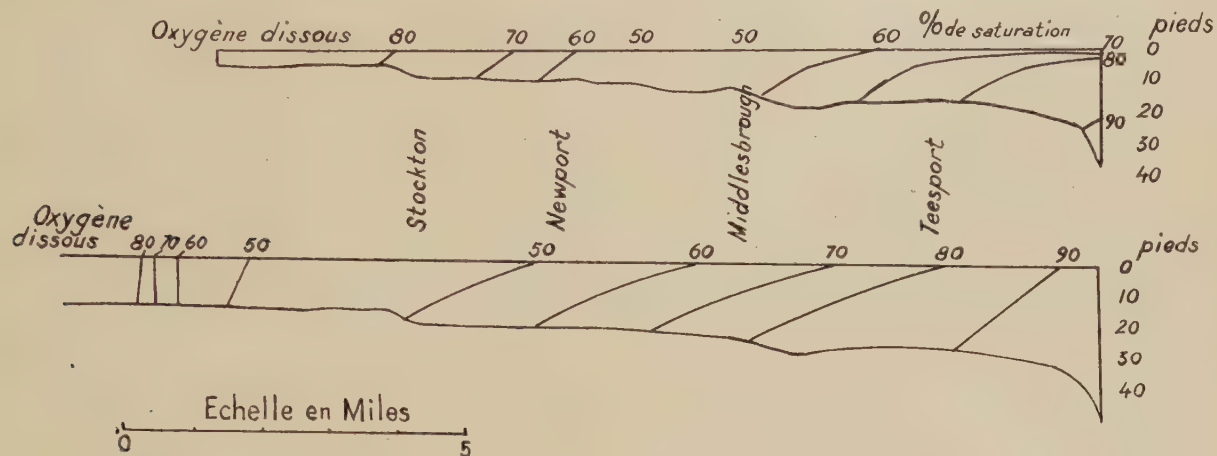


FIG. 60. — Estuaire de la Tees.  
Courbes d'égale teneur en oxygène (% de saturation), à basse mer et à haute mer.

pas remplacé assez rapidement par de l'oxygène de l'air et c'est pourquoi les eaux de l'estuaire auraient une teneur en oxygène (ou un pourcentage de saturation) moins élevé que les eaux douces ou marines.

#### 4. — L'oxygène dissous dans les eaux de l'estuaire de la Seine.

P. CHAUCHARD (1934) a effectué quelques dosages dans cet estuaire :

La teneur en oxygène dissous augmente de l'eau douce à l'eau de mer (7 mgr. 58 à Villequier [eau douce], 8 mgr. 75 à Honfleur, et 9 mgr. 14 au Havre), mais l'auteur ne précise malheureusement pas si les prises ont été effectuées à la même heure. L'eau douce serait sous-saturée, l'eau saumâtre saturée et l'eau de mer légèrement sur-saturée.

La teneur en oxygène est plus élevée, toutes choses égales d'ailleurs, en marée de morte eau qu'en marée de vive eau. Ce qui expliquerait, suivant l'auteur, par suite d'une plus grande teneur en suspensions (matières réductrices) en marée de vive eau.

La teneur en oxygène varie en un même point avec l'heure d'observation : le maximum s'observe vers 18 heures, tandis que le minimum a lieu au petit jour. C'est l'activité photosynthétique qui est responsable de ces variations ; mais CHAUCHARD pense que la marée, en tant que phénomène dynamique (remise en suspensions de matières réductrices), peut, même en eau douce (comme c'est le cas au Trait), jouer un certain rôle.

## 5. — L'oxygène dissous dans les eaux de l'estuaire de la Rance (canalisée.).

Ces observations sont encore dues à P. CHAUCHARD (1939). Elles peuvent être ainsi résumées :

La teneur en oxygène, en un point, croît avec l'heure d'observation (photosynthèse) : elle est donc minima à l'aube et maxima en fin de journée. Elle est d'autant plus élevée que la journée est plus ensoleillée.

La teneur en oxygène est généralement plus élevée en surface qu'au fond (pénétration moindre de la lumière).

Au cours de la journée, les eaux de surface, comme celles du fond, ont tendance à se sursaturer.

Les teneurs en oxygène sont moins élevées en été et en automne qu'au printemps et en hiver (influence de la température), mais la saturation et même la sur-saturation sont presque toujours atteintes. La variation de teneur en oxygène est plus grande en été qu'en hiver, par suite de la plus grande variation de la température au cours de la journée.

Dans l'estuaire de la Rance, la teneur en oxygène dissous est donc sujette à d'importantes variations (elle passe de la sous-saturation à la sur-saturation); l'eau douce fluviale a également une teneur en oxygène très variable (sous-saturation et sur-saturation); pour l'eau de mer du littoral (Saint-Servan), la teneur en oxygène est du même ordre de grandeur que dans l'estuaire; mais la sursaturation est un état plus régulier et plus constant, surtout au printemps.

En résumé, la teneur en oxygène dissous est, dans l'estuaire de la Rance, très variable, pouvant aller de 7 mgr. 5 à 12 mgr. au fond, de 9 mgr. à 15 mgr. en surface; tantôt ce sont des valeurs de sous-saturation, tantôt de sursaturation, tantôt de saturation. L'activité photosynthétique dépendant de la lumière (jour et nuit), l'insolation est la cause principale de ces variations; mais il ne faut pas oublier, non plus, le rôle des matières organiques réductrices en suspensions dans l'eau (rôle du coefficient de marée).

## 6. — L'oxygène dissous dans l'eau de mer littorale.

OBSERVATIONS DE R. LEGENDRE, A CONCARNEAU. — Tandis que la salinité demeure constante et que la température de l'eau ne varie au cours de la journée que de 13°6 à 7 heures du matin, à 14°6 à 16 heures, par contre, la teneur en oxygène dissous subit de plus amples fluctuations. La teneur en oxygène est minimum à 7 heures du matin avec 7 mgr. 9 (légère sous-saturation : % de saturation = 93); elle croît régulièrement jusqu'à 16 heures (maximum de température) où elle atteint 9 mgr. 9 (nette sur-saturation : % de saturation = 119), après quoi elle diminue de nouveau lentement.

Ces observations sont très intéressantes, car elles montrent que quand les facteurs salinité et température (dans une certaine mesure) sont éliminés, parce que constants, la teneur en oxygène varie dans une large mesure au cours de la journée et que c'est, sans aucun doute, l'activité photosynthétique qui en est responsable.

OBSERVATIONS A ROSCOFF (fig. 61). — Au pied du vivier du laboratoire, le 14 octobre 1941, j'ai dosé l'oxygène dissous entre le lever du jour et midi; la salinité était à peu près constante (35,2 ‰) :

| H.    |          |             |       |                  |
|-------|----------|-------------|-------|------------------|
| 6 15  | 11° C.   | 3,3 mgr.-l. | 37    | % de saturation. |
| 8 15  | 11° C.   | 8 »         | 89,8  | »                |
| 10 15 | 12° 5 C. | 8,27 »      | 95,6  | »                |
| 12    | 13° C.   | 9,10 »      | 106,1 | »                |

La teneur en oxygène extrêmement basse, constatée à 6 h. 15 du matin (il faisait encore nuit), est assez difficile à expliquer : toutefois, il faut savoir que le point de prélèvement se trouve être dans une zone où la végétation (algues, zostères) est particulièrement abondante. Comme dans les observations de R. LEGENDRE, à Concarneau, on voit la teneur en oxygène, très faible et très sous-saturée, croître au cours de la matinée pour atteindre et dépasser, à 12 heures, la saturation. Cette augmentation régulière n'est imputable qu'à l'activité photosynthétique.

#### 7. — Conclusions relatives à la teneur en oxygène des eaux d'estuaire.

L'exposé des résultats obtenus par différents chercheurs, sur plusieurs estuaires, fait apparaître beaucoup de contradictions et rend toute conclusion bien difficile.

On vient de voir qu'en mer, la teneur en oxygène des eaux littorales est soumise, d'une façon régulière, à l'activité photosynthétique du peuplement végétal. Cette activité est liée, à son tour, à l'éclairement et la variation de la teneur oxygène varie au cours de la journée entre une valeur minima au lever du jour, et une valeur maxima entre 14 et 16 heures. Ceci est très normal.

Dans un estuaire, on aurait pu s'attendre à des variations du même type. Mais si elles existent, ce dont on est bien obligé de ne pas douter, elles sont masquées, par un grand nombre d'autres facteurs.

Tout d'abord par la variation de salinité de l'eau qui entraîne, pour l'oxygène, une plus ou moins grande possibilité de dissolution. La variation en fonction de la marée de salinité n'est cependant pas très nette.

La teneur en suspensions, qui contient un fort pourcentage de matières réductrices, varie avec la marée et, comme on le verra, pas toujours dans le même sens : tantôt elle est minima à basse mer, tantôt à haute mer, suivant la zone considérée.

La teneur en oxygène doit, en principe, varier en sens inverse de cette teneur en suspensions : c'est ce que P. CHAUCHARD semble avoir montré dans l'estuaire de la Seine; la teneur en suspensions est plus élevée au fond qu'en surface : la lumière pénètre donc d'autant moins facilement et ce fait, lié au plus grand pouvoir réducteur, explique que la teneur en oxygène soit généralement plus faible au fond qu'en surface. Mais il ne faut pas oublier qu'il y a aussi des inversions. Comment les expliquer ? Peut-être, et vraisemblablement, par suite des tourbillons à axe horizontal.

En tout cas, il me semble que les teneurs en oxygène, plus faibles, observées par les Anglais, dans l'estuaire de la Tees, dans l'eau de mer ou dans l'eau douce, sont également liées à la plus grande teneur en suspensions.

Le plancton végétal subit des variations avec la marée et ses fluctuations ne sont pas sans influence sur la teneur en oxygène des eaux de surface.

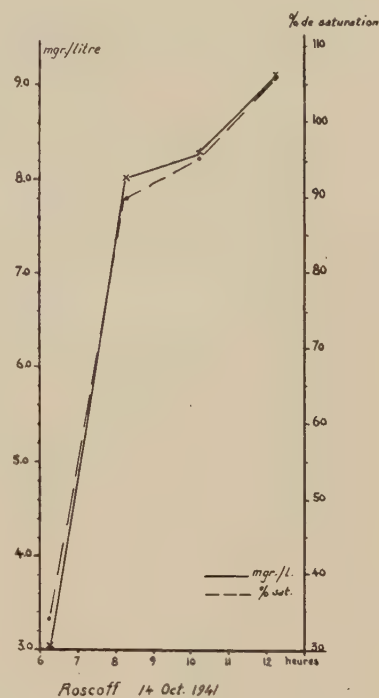


FIG. 61. — Variations de la teneur en oxygène dissous de l'eau de mer à Roscoff (octobre 1941).

Un grand nombre de facteurs interviennent donc pour que la teneur en oxygène

Avant d'en finir avec ce chapitre, je voudrais bien insister sur un point qui semble même qu'il soit pour l'instant impossible d'arriver à une compréhension satisfaisante des valeurs mesurées. En chaque point particulier, on peut, certes souvent, déceler les causes d'une teneur déterminée en oxygène : forte ou faible teneur en suspensions, temps ensoleillé ou couvert, abondance locale d'algues, température, salinité de l'eau. Il faut donc multiplier en très grand nombre les mesures avant de pouvoir énoncer une description satisfaisante de la répartition (et de ses causes) de l'oxygène dissous dans les eaux d'estuaire.

Avant d'en finir avec ce chapitre, je voudrais bien insister sur un point qui semble intéresser particulièrement les ichthyologistes.

CHEVEY et ROULE (1937) ont soutenu que la teneur en oxygène dissous augmente progressivement lorsqu'on passe de l'eau de mer à l'eau douce. Ils considèrent cette augmentation comme le tropisme déterminant ou tout au moins guidant les migrations de poissons euryhalins, comme les saumons ou les anguilles. Je pense que les résultats qui viennent d'être exposés — quelque contradictoires qu'ils paraissent — suffisent pour montrer que l'estuaire constitue une zone où justement il y a dans l'ensemble *déficience d'oxygène*, par rapport à l'eau de mer ou à l'eau douce.

Mais, déjà les travaux entrepris par le Laboratoire de Physiologie de P. PORTIER, et particulièrement par M. FONTAINE (1932, 1943), montrent que l'oxygène n'est pas le facteur déterminant de ces migrations.

## CHAPITRE VI. — TENEUR EN SUSPENSIONS ET TRANSPARENCE

La teneur en produits en suspension (à l'exclusion des produits dissous) d'un courant d'eau, s'exprime en grammes de produits secs pour 1.000 cc. d'eau.

Un problème se pose immédiatement : de quelle manière mesurer la teneur en suspensions ? Faut-il faire des prélèvements instantanés d'eau, qui donneront des valeurs sujettes à des variations brusques et rapides par suite de la turbulence ? Faut-il exécuter des prélèvements lents qui donnent alors des valeurs moyennes ? Dans le premier cas, il faut des types d'appareils permettant des prises d'eau instantanées : bouteille Collet, bouteille spéciale « Pellerin » (1939). Dans le second, une bouteille quelconque suffira.

De toute manière, il est préférable d'opérer sur de grandes quantités et on peut, dans ce cas, envisager même l'utilisation d'une pompe (valeur moyenne).

Dans la pratique, quand on opère, seul, dans un estuaire où les courants sont violents et dans une petite barque, on se contente de méthodes rudimentaires. Là encore, je regrette donc de ne donner que des résultats en assez faible nombre : le transport et la manipulation de 20 litres ajoutés à tous les autres instruments et matériel n'ont rien de particulièrement commode.

Toutes les mesures de teneur en suspensions (ou turbidité) ont été effectuées à l'aide d'un flacon d'un litre descendu bouché, puis débouché à la profondeur désirée. Après la remontée : transvasement dans des bouteilles de 1.000 cc. Au laboratoire : filtration du liquide sur filtre (séché à l'étuve à 110°, refroidi dans un dessiccateur et pesé). Mise à l'étuve du filtre et de son contenu. De nouveau pesée après séchage. L'augmentation de poids donne la teneur en suspensions dans un litre. Il s'agit donc de valeurs moyennes (temps de remplissage du flacon), mais comparables entre elles.

En ce qui concerne la transparence, faute d'équipement en appareil de mesure absolue (montage avec cellule photo-électrique) déjà utilisé pour la première fois en mer par W. ATKINS

(1933), je me suis servi du classique disque de Secchi (blanc et de 30 cm. de diamètre). Cette méthode est déjà très ancienne : elle a été utilisée tant en limnologie qu'en océanographie ; elle est rudimentaire, mais donne, faute de mieux, des indications bien intéressantes. En lestant suffisamment le disque, il est utilisable par forts courants.

Je n'ai, d'ailleurs, pas toujours pu mesurer, à la fois, la teneur en suspensions et la transparence. Il va sans dire que lorsque la teneur en suspensions dépasse une certaine limite, la mesure de transparence n'est plus possible.

#### I. ESTUAIRE DU BOU-REGREG. STATION D'OBSERVATION DE LA TOUR HASSAN :

A. *En période d'étiage.* — a) *Le 16 septembre 1940, en flot* : D'après les graphiques (fig. 62), on peut dire : 1° Que la teneur en suspensions est, en règle générale, plus élevée au fond qu'en surface (différence de l'ordre de 0 gr. 1) et que les courbes sont longtemps parallèles.

2° Que le maximum s'observe à basse mer, et le minimum deux heures avant la haute mer.

3° Que la transparence augmente régulièrement avec l'heure du flot ; elle varie donc dans l'ensemble en sens inverse du débit solide.

4° Le palier observable dans le graphique de transparence correspond au minimum de turbidité, au maximum de salinité, à la vitesse maxima du courant, au pH maximum.

Cette série de mesures est intéressante, car elle permet de voir que les différents facteurs physiques et chimiques varient assez synchroniquement.

b) *Le 10 octobre 1940, en jasant* (fig. 63) : 1° La courbe de variation de la turbidité en surface ne suit pas du tout celle du fond. Le débit solide est plus élevé en surface qu'au fond.

2° Au fond, la teneur en suspensions varie entre des limites assez étroites, tandis qu'en surface des sautes brusques apparaissent, sans qu'on en saisisse très bien la cause, sinon celle, toujours plus ou moins juste (puisqu'il s'agit de valeurs moyennes), des tourbillons.

3° Les graphiques sont d'autant plus difficilement interprétables que la courbe de salinité est régulièrement décroissante et que l'on ne possède pas, à titre de contrôle et de comparaison, de mesures de transparence.

B. *En période de crues.* — *Le 28 octobre 1940, en jasant* (fig. 64) : 1° Le minimum de turbidité, tant au fond qu'en surface, s'observe à haute mer ; le maximum à basse mer (ou un peu avant).

2° La teneur en suspensions est plus élevée au fond qu'en surface, mais la différence, qui est faible à haute mer, croît dans de fortes proportions à mesure que la mer baisse.

3° A haute mer, la teneur en suspensions est de 0 gr. 1 en surface et 0 gr. 2 au fond, tandis qu'à basse mer ces teneurs sont respectivement de 0 gr. 9 et de 2 gr. 3. L'amplitude de la variation est donc élevée puisqu'elle atteint 2 gr., alors qu'en flot, le 16 septembre 1940, elle n'était que de 0 gr. 2.

4° La valeur élevée de la turbidité explique facilement que la transparence soit toujours très faible. Cependant, on voit qu'elle diminue quand les suspensions augmentent de densité.

5° Si l'on compare cette augmentation rapide de teneur en suspensions à la courbe de la salinité, on s'aperçoit qu'elles sont en étroites liaisons : la valeur maxima de turbidité correspond à un grand apport d'eau douce fluviale.

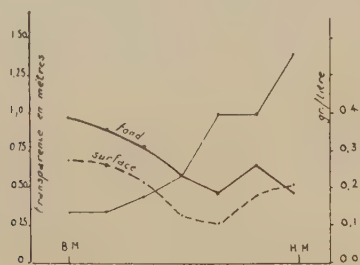


FIG. 62.

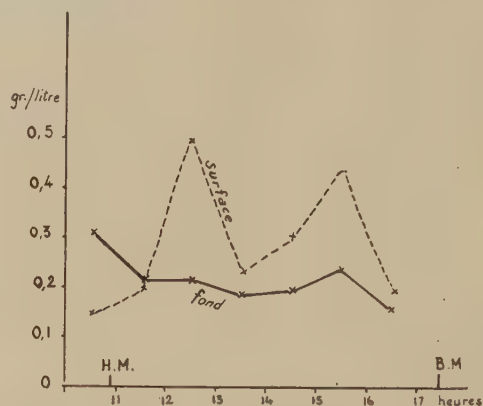
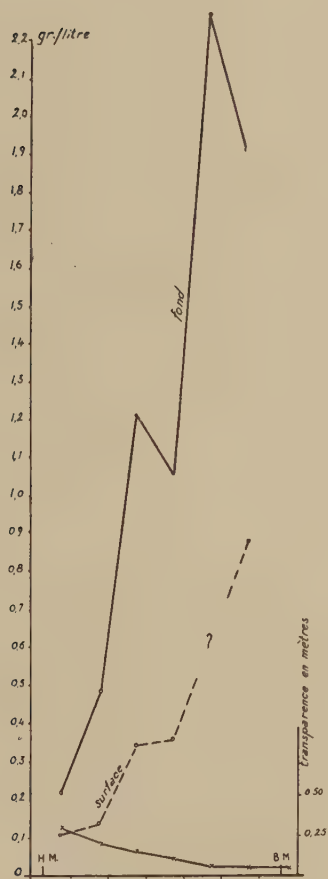


FIG. 63.



Tour Hassan (28 Oct. 1940)

FIG. 64.

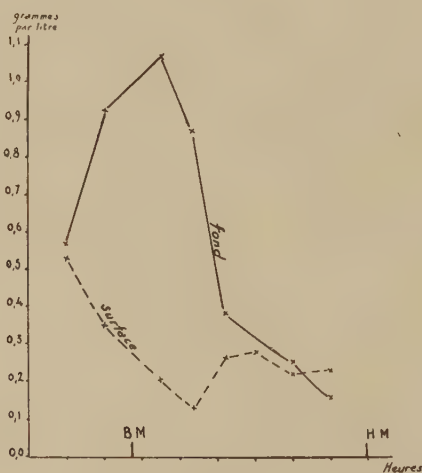


FIG. 65.

FIG. 62. — Variations de la teneur en suspensions et de la transparence à la Tour Hassan (Bou-Regreg), le 16-IX-1940.

FIG. 63. — Id, le 28-IX-1940.

FIG. 64. — Id., le 10-X-1940.

FIG. 65. — Id., le 7-IX-1940.

c. En période intermédiaire. — Le 7 septembre 1940, en flot (fig. 65) : 1° La teneur en suspensions est presque constamment plus élevée au fond qu'en surface. Mais elle varie de façon différente au fond et en surface.

2° Au fond, on observe le maximum très net à basse mer et le minimum à haute mer. L'amplitude de la variation étant de 1 gr.

3° En surface, la variation est moins nette, un premier minimum se situant 1 h. 30 environ après la basse mer et un deuxième plus normal, apparaissant à haute mer.

4° Aucune mesure de salinité ou de transparence n'ayant été effectuée, il n'est pas possible de faire des comparaisons qui auraient pu diriger une interprétation.

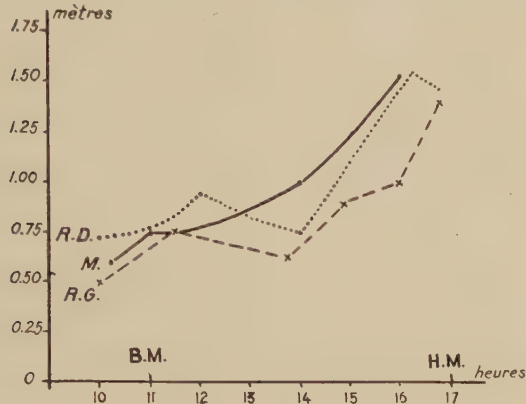


FIG. 66.

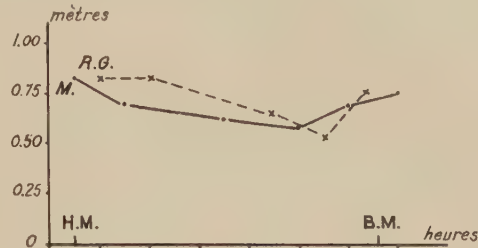


FIG. 67.

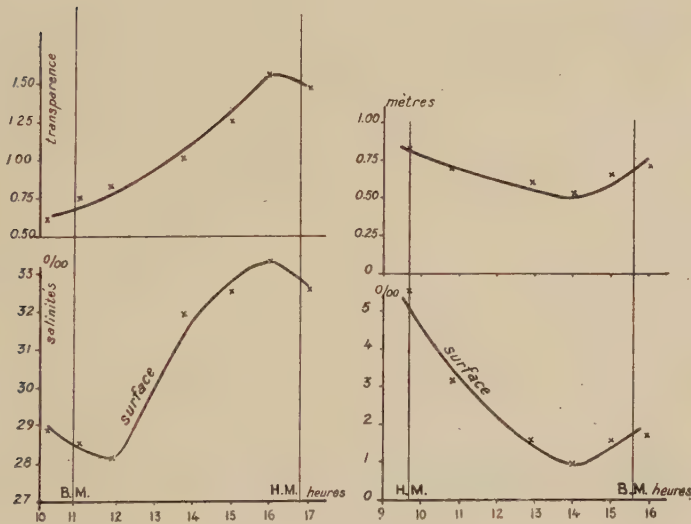


FIG. 68.

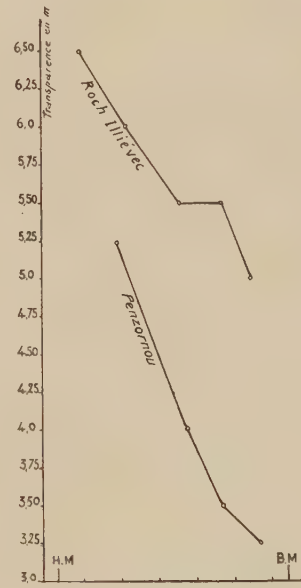


FIG. 69.

FIG. 66. — Variations de la transparence au cours du flot à Trégarvan (estuaire de l'Aulne), en septembre 1938.

FIG. 67. — Id., en décembre 1938.

FIG. 68. — Mêmes résultats comparés à la salinité.

FIG. 69. — Variations de la transparence dans l'estuaire de la Penzé.

## II. ESTUAIRE DE L'AULNE. STATION D'OBSERVATION DE TRÉGARVAN (fig. 66) :

1. *En été* (faible débit fluvial), *en flot*. — Aucune mesure de turbidité n'a été faite; par contre, des mesures de transparence ont été effectuées le long des rives.

a) *Au milieu de l'estuaire* : On voit que la transparence minimum à basse mer est maximum une heure avant la haute mer. Entre ces deux valeurs, elle croît d'une manière continue. A haute mer même, elle commence déjà à diminuer.

b) *Le long des rives* : Les remarques à faire sont, dans l'ensemble, les mêmes, en ajoutant que l'augmentation de la salinité avec la marée est beaucoup moins régulière; que la courbe fait de brusques coudes qui ne sont, une fois de plus, explicables que par l'existence de tourbillons particulièrement violents le long des rives et sur lesquels on a déjà suffisamment insisté.

2. *Hiver* (fort débit fluvial), *en jusant* (fig. 67). — Mêmes remarques qu'en été, quant aux mesures de turbidité et de transparence.

La transparence le long des rives se rapproche beaucoup de celle du milieu de l'estuaire : maximum à haute mer, minimum un peu avant basse mer.

La différence avec les courbes d'été consiste surtout en ce que l'amplitude de la variation est moins grande : 1 m. en été au cours de la marée, 0 m. 25 en hiver. D'autre part, la transparence est constamment plus faible en hiver (0 m. 50 - 0 m. 75) qu'en été (0 m. 50 - 1 m. 50), ce qui s'explique facilement par le plus fort débit fluvial (donc plus forte teneur en suspensions).

3. *Transparence et salinité* (fig. 68). — Si l'on compare la courbe de la variation de salinité (de surface ou de fond) avec celle de la variation de transparence au cours d'une marée, on est frappé de leur parallélisme presque rigoureux, aussi bien en été qu'en hiver. La transparence augmente donc à mesure que la proportion d'eau de mer augmente et elle diminue quand la proportion d'eau fluviale s'accroît.

III. ESTUAIRE DE LA PENZÉ. — Les mesures effectuées dans cet estuaire sont rares.

1. *Teneur en suspensions. — Septembre 1941* :

|                                                  | Grammes<br>par litre |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| Village de Penzé : Basse mer (eau douce) .....   | 0,122                |
| Haute mer (surface : S. = 13,9 ‰) .....          | 0,210                |
| (fond : S. = 30,83 ‰) .....                      | 0,430                |
| Pont de la Corde : Basse mer (S. = 24,5 ‰) ..... | 0,370                |
| Haute mer (surface : S. = 34,16 ‰) .....         | 0,200                |
| (fond : S. = 34,99 ‰) .....                      | 0,102                |

Il faudrait un plus grand nombre de mesures pour pouvoir tirer une conclusion, mais il est cependant possible de noter que les valeurs de la teneur en suspensions sont inverses pour les deux points d'observation. A Penzé, ce sont les eaux à salinité élevée qui transportent le maximum de particules, tandis qu'au Pont de la Corde, ce sont les eaux les moins salées qui, à basse mer, sont les plus chargées. On verra plus loin comment il est possible d'interpréter ces résultats.

2. *Transparence* (fig. 69). — Plus en aval, et même en baie de Morlaix, les mesures de transparence montrent qu'elle diminue avec le jusant. Le minimum de transparence a lieu à basse mer, tant à Penzornou qu'à Roch'Illicvec. On peut constater aussi que la transparence est constamment plus élevée à Roch'Illicvec (en baie de Morlaix) qu'à Penzornou, ce qui d'ailleurs semble normal.

Enfin, on constatera que la transparence est beaucoup plus élevée dans l'estuaire de la Penzé (où elle varie, à Penzornou, entre 3 m. 25 et 5 m. 25) que dans celui de l'Aulne et du Bou-Regreg. L'explication est à rechercher simplement dans un débit fluvial qui est tout à fait insignifiant.

IV. ESTUAIRE DE LA LOIRE, EN JUIN 1942. — Observations en période de faible débit fluvial par différents coefficients de marée.

1. *Nantes-Chantenay*. — a) La transparence, quel que soit le coefficient de marée et quelle que soit l'heure de la marée, est toujours égale ou très voisine de 1 m.

b) La teneur en suspensions n'obéit pas à des variations nettes avec l'heure de la marée et elle est tantôt plus élevée au fond qu'en surface, et tantôt c'est l'inverse qui a lieu. Toutefois elle augmente, en moyenne, avec le coefficient de marée.

| Valeurs moyennes<br>de la teneur<br>en suspensions | Coefficient<br>de marée |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| 0,100                                              | 48                      |
| 0,100                                              | 74                      |
| 0,150                                              | 97                      |
| 0,350                                              | 100                     |

2. *La Maréchale*. — a) Dans l'ensemble, la transparence diminue avec le flot et croît avec le jusant; d'autre part, elle est d'autant plus grande que le coefficient de marée est plus élevé, ainsi que le montre le tableau suivant :

| Coefficients | 100  | 97   | 74   | 48   |
|--------------|------|------|------|------|
|              | m.   |      |      |      |
| Maxima.....  | 1    | 1    | 0,90 | 0,45 |
| Minima.....  | 0,30 | 0,25 | 0,20 | 0,10 |

b) La teneur en suspensions varie assez irrégulièrement avec le coefficient, l'heure de la marée et même la profondeur.

| Coefficients     | 100   | 97    | 74    | 48  |
|------------------|-------|-------|-------|-----|
|                  | gr.   |       |       |     |
| Maximum moyen... | 1     | 1-1,2 | 0,8   | 1   |
| Minimum moyen... | 0 (?) | 0,2   | 0 (?) | 0,1 |

Il apparaît cependant que les valeurs maxima sont atteintes aux environs de la haute mer, et les valeurs minima aux environs de la basse mer.

Par ailleurs, la teneur en suspensions, au fond, a tendance à être plus élevée qu'en surface.

3. *Saint-Nazaire*. — a) La transparence diminue avec le jusant et augmente avec le flot; d'autre part, elle est d'autant plus grande que le coefficient de marée est plus fort :

| Coefficients | 100  | 97   | 74   |
|--------------|------|------|------|
| Maxima.....  | 1,60 | 1    | 0,40 |
| Minima.....  | 0,60 | 0,40 | 0,35 |

b) La teneur en suspensions est maximum à basse mer et minimum à haute mer; elle est d'autant plus élevée que le coefficient de marée est plus fort (ce qui semble à première vue contredire les mesures de transparence). En général, elle est plus élevée au fond qu'en surface, mais il peut y avoir égalité et même inversion :

| Coefficients | 100        | 97  | 74   |
|--------------|------------|-----|------|
| Maxima.....  | gr.<br>1,5 | 1,4 | 0,40 |
| Minima.....  | 0,2        | 0,2 | 0,35 |

V. ESTUAIRE DE LA TEES. — Il n'existe qu'un très petit nombre de données sur cet estuaire. Les conclusions que les auteurs tirent, quant à la teneur en suspensions, sont qu'elle augmente

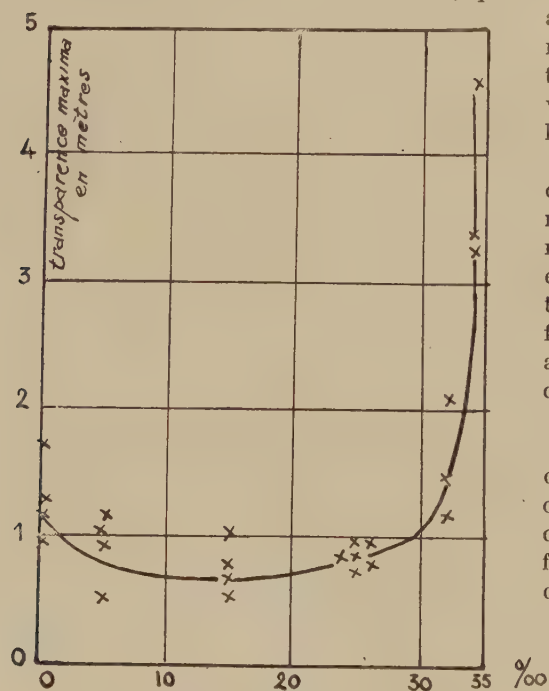


FIG. 70. — Estuaire de la Tees.  
Variations de la transparence  
avec le degré de salinité.

avec le débit fluvial, qu'elle est plus élevée à basse mer qu'à haute mer, et que, tantôt, c'est en surface, tantôt, c'est au fond qu'elle est la plus élevée. On voit que mes propres résultats concordent avec les leurs.

Quant à la transparence, mesurée à l'aide du disque de Secchi, elle obéit, dans cet estuaire, aux règles qui viennent déjà d'être signalées : elle augmente quand la proportion d'eau de mer augmente; elle est minimum avec les eaux saumâtres de l'estuaire et augmente de nouveau avec l'eau douce fluviale. Le graphique donné (fig. 70) par les auteurs anglais est suffisamment significatif pour qu'il soit inutile d'insister.

VI. ESTUAIRE DE LA GIRONDE. — Les recherches de LOUIS GLANGEAUD dans l'estuaire de la Gironde ont porté notamment sur le débit solide. Selon cet auteur, la transparence est constamment trop faible pour que l'on puisse tenter de se servir du disque de Secchi pour la mesurer. Les mesures de turbidité ont été effectuées à l'aide de bouteilles à prise instantanée ou retardée. L'auteur ne donne malheureusement que peu de chiffres récents : il signale simplement qu'il a pu constater des variations très grandes de la teneur en suspensions dans un espace de temps très court. Ainsi, en 1 seconde, elle passait de 0 gr. 57 à 1 gr. 13. Dans une publication antérieure L. GLANGEAUD (1938) s'est servi de séries de mesures de débit solide effectuées dans l'estuaire de la Gironde, en 1893, pour interpréter ses variations. Ses conclusions peuvent être ainsi résumées :

1. Dans la partie fluviale de la Garonne, en dehors des périodes de crues, la teneur en suspensions est faible (0 gr. 5).

2. Entre Bordeaux et Pauillac, en période d'étiage, la teneur en suspensions est considérable, pouvant dépasser 40 gr.-l. au fond. Ce « stock de troubles d'estuaire » ou « bouchon vaseux » oscille à chaque marée remontant avec le flot, descendant avec le jusant. Au moment des crues, ce stock de matières en suspensions est chassé hors de l'embouchure, et il y a alors moins de troubles dans l'estuaire avant une crue qu'après la crue.

L'examen des figures de répartition de la teneur en suspensions données par L. GLANGEAUD, d'après les mesures effectuées en 1893, permet, de plus, de tirer quelques conclusions supplémentaires :

1° La teneur en suspensions est généralement plus élevée au fond qu'en surface.

2° Pour un point de l'estuaire, la teneur en suspensions diminue quand la proportion d'eau de mer augmente.

VII. OBSERVATIONS SUR LA COLORATION DES EAUX MARINES LITTORALES AU VOISINAGE DES EMBOUCHURES D'ESTUAIRES. — Les observations sur la couleur des eaux marines, fluviales et lacustres, sont innombrables; on a même, dans certains cas défini des gammes de couleur de manière à déterminer qualitativement les produits qui y sont en suspensions.

En ce qui concerne les eaux d'estuaire, on peut dire que leur couleur habituelle tire nettement sur le jaune et que cette couleur s'efface progressivement à mesure que le pourcentage d'eau marine est plus élevé.

A l'embouchure des estuaires, la couleur des eaux est la plus changeante, parce qu'il s'y fait sentir encore l'état d'agitation de la mer et notamment les vagues. Ceci est surtout vrai pour les estuaires alimentés par un débit fluvial élevé (Seine, Loire), car, en ce qui concerne les petits estuaires bretons, les eaux marines à leur embouchure ne voient pas leur couleur changer beaucoup. Par contre, en baie de Seine, en face du Havre ou de Honfleur, la couleur des eaux change considérablement avec l'état d'agitation de la mer : par temps calme, les eaux sont relativement claires et grises, tandis que, par forte houle, elles deviennent d'un jaune foncé au point que l'on croirait presque avoir, devant soit, une suspension vraie.

J'ai pu observer, au large de la côte marocaine, la couleur des eaux littorales aux embouchures des oueds Sebou, Bou-Regreg et Oum er Rbia. C'était au mois de janvier et les débits fluviaux étaient forts, sans être toutefois des débits de crues, mais celles-ci avaient eu lieu quelque temps auparavant.

Aux trois embouchures, l'eau était d'un jaune sale, couleur qui s'accroissait à mesure qu'on s'approchait des estuaires. Cette couleur affectait les eaux littorales sur une zone plus ou moins grande; c'était sans aucun doute la zone de l'Oum er Rbia (fig. 22) qui était la plus vaste et la plus teinte. Elle s'étendait très nettement vers le Sud et les eaux côtières à Mazagan étaient toujours très jaunes. C'est en la St. 1, à haute mer, que l'on pouvait situer une limite nette entre les eaux continentales et les eaux bleu et vert marines.

A l'embouchure du Bou-Regreg (fig. 23), tout de suite au Nord de l'embouchure, les eaux sont bleues, tandis que vers l'Ouest et le Sud-Ouest, on suit facilement les eaux à coloration jaunâtre.

Ces observations faites en fin de jusant et en début de flot indiquent que le courant littoral semble être dirigé vers le Sud-Sud-Ouest. Mais il est possible qu'en flot, il se renverse, car on retrouve sur le littoral, au Nord de Rabat, les épaves et les noyés dont le point de départ initial est au Sud de Rabat.

A l'embouchure de l'oued Sebou (fig. 24), même à haute mer, les eaux sont colorées. Ces eaux forment une tache qui, à l'encontre des deux cas précédents, se développe vers

le Nord à mesure que l'heure du jusan avance. J'ai pu suivre les eaux colorées jusqu'à la St. 8. Dès la St. 9, les eaux étaient de nouveau bleues. Vers le Sud, au contraire, la tache dépasse à peine les jetées de Mehedia. Vers l'Ouest, elle est limitée par les St. 6 et 7 en fin de jusan.

Des observations aériennes que j'ai pu faire au-dessus de l'embouchure du Sebou et du Bou-Regreg, quelques jours auparavant, confirment ces descriptions. Les circonstances m'empêchent malheureusement de publier des photos qui montrent très nettement l'extension de ces taches.

Si l'on se reporte aux mesures de salinité et de température que j'ai données dans les chapitres précédents pour ces trois régions, on voit nettement que la couleur des eaux (donc la teneur en suspensions, donc aussi la transparence) est en rapport direct avec la zone d'extension des eaux fluviales (salinités moindres). Encore une fois se vérifie la remarque qui a été faite : la teneur en suspensions décroît quand la proportion d'eau marine augmente.

VIII. INTERPRÉTATION GÉNÉRALE DES RÉSULTATS. — Les résultats obtenus dans différents estuaires permettent d'énoncer quelques remarques générales sur la répartition et les variations de teneur en suspension et, par voie de conséquence, sur la transparence.

La teneur en suspensions et la transparence des eaux d'estuaire varient en sens inverse l'une de l'autre; la teneur en suspensions diminue quand la salinité augmente; la transparence augmente quand la salinité augmente; la teneur en suspensions, toutes choses égales d'ailleurs, augmente de l'embouchure vers l'amont, passe par un maximum, puis diminue lorsque le phénomène de marée ne se fait plus sentir; la teneur en suspensions est presque toujours plus élevée près du fond qu'en surface.

Ces faits demandent une explication :

Que la teneur en suspensions et la transparence varient en sens inverse, rien n'est plus normal et le contraire serait étonnant. Mais, par contre, la diminution de la teneur en suspensions et l'augmentation de la transparence en fonction de l'augmentation de salinité en un point de l'estuaire, pose un problème : la teneur en suspensions diminue-t-elle parce que la salinité augmente, c'est-à-dire parce qu'il y a apport d'électrolytes et floculation possible ? ou bien diminue-t-elle simplement parce qu'il y a remplacement des eaux chargées de l'estuaire par des eaux marines beaucoup moins chargées ? Dans le premier cas, la diminution de teneur en suspensions serait imputable à des processus physicochimiques; dans le second, à des processus purement mécaniques.

Je réserve pour un chapitre ultérieur la discussion de ce problème, car il intéresse au premier chef les phénomènes de sédimentation dans les estuaires. Mais il faut dire cependant, dès maintenant, qu'il est vraisemblable de croire que les deux processus jouent un rôle, mais que c'est le second qui est dominant.

La répartition des troubles dans l'estuaire, en fonction de l'heure de la marée, est très mal connue; mais il semble — en se référant d'une part aux mesures exécutées en 1893 dans la Gironde (L. GLANGEAUD, 1938) et, d'autre part, à celles très peu nombreuses que j'ai faites dans la Penzé, puis à celles exécutées dans l'estuaire de la Loire, que la teneur en suspensions n'est pas partout maximum à basse mer. En effet, dans la zone où le jusan se fait sentir le plus longtemps et où l'on peut même rencontrer des eaux douces (village de Penzé, environs de Bordeaux, la Maréchale), le minimum de teneur en suspensions a

lieu à basse mer tandis qu'à haute mer, les eaux chargées de l'estuaire se trouvent refoulées en cette zone. En ce sens, je suis pleinement en accord avec L. GLANGEAUD pour penser que le stock de troubles — ou bouchon vaseux — oscille d'amont en aval et d'aval en amont avec chaque marée.

Selon GLANGEAUD, l'évacuation du stock n'aurait lieu, dans le cas de la Gironde, qu'en période de crues ou par coefficient de marée élevé. Il n'y a pas de doute, qu'en effet, l'évacuation, dans ces conditions se trouve facilitée; mais, à chaque marée, une partie est évacuée avec le jusant. En effet, il suffit de se reporter au graphique (fig. 16) que j'ai exécuté pour indiquer le transport résultant dans l'estuaire de la Tees, en période d'étiage, par fortes marées. C'est d'ailleurs là un phénomène d'observation évident, confirmé par celle que j'ai indiquée aux embouchures des trois oueds marocains que j'ai étudiés. Dans les trois cas, la coloration des eaux littorales ne laisse aucun doute sur l'importance de l'apport en suspensions par les eaux de l'estuaire.

Je rappellerai aussi que c'est à plusieurs dizaines de milles de la côte que les navigateurs reconnaissent par leur couleur (teneur en suspensions), les eaux venant du Congo ou de l'Amazone.

Si, en périodes de crues, l'évacuation des suspensions se trouve facilitée, c'est à de tels moments que la teneur en suspensions est aussi la plus élevée dans les eaux d'estuaire: exemple du Bou-Regreg où la teneur en suspensions maxima, en étiage à la Tour Hassan, est de 1 gr. 4, contre 2 gr. 3 en période de crues.

La teneur en suspensions est presque toujours plus élevée au fond qu'en surface. L'explication semble assez simple: d'une part, toute particule en suspension a tendance à tomber sur le fond par suite de la pesanteur et si elle ne l'atteint pas, c'est à cause de la turbulence des courants; d'autre part, on a vu qu'il existe, au contact du lit de l'estuaire, une zone tourbillonnaire (tourbillons à axes horizontaux perpendiculaires à la direction du courant), qui, dans une certaine mesure, peut éroder ou tout au moins remettre en suspensions les particules déposées auparavant.

La transparence des eaux est une donnée qui, à côté d'un intérêt hydrodynamique, possède aussi un intérêt biologique. En effet, elle conditionne la pénétration de la lumière dans l'eau et, de ce fait, l'activité photosynthétique des algues. A vrai dire, les variations de transparence ne doivent avoir que peu d'importance, car, dans un estuaire, la population algologique est d'abord rare, et, ce qui existe, est localisé dans les parties hautes des rives. Sur la slikke submergée, on ne trouve guère que des algues tout à fait inférieures (Diatomées, Cyanophycées), quelques Entéromorphes et, en certains points, des zones de *Fucus lutarius*. La vie intense des zones intercotidales du littoral marin ne se retrouve pas dans un estuaire. On peut penser aussi que la présence de particules en suspension, constituées souvent de matière organique, conduit à la réalisation d'un grand pouvoir réducteur de l'eau; pourtant, en réalité, la teneur en oxygène dissous est, très souvent, supérieure à la tension de saturation.

## CHAPITRE VII. — TABLEAU D'ENSEMBLE DU MILIEU FLUVIO-MARIN

Après ce long exposé de résultats et de mesures, il est nécessaire de faire le point de ce que l'on peut considérer comme acquis définitivement, et de ce qui reste à faire dans ce domaine de la physicochimie des eaux fluvio-maritimes.

Il apparaît tout d'abord que le milieu fluvio-marin est, en tout temps et en tout lieu, dominé par la mer et ses rythmes de pulsation. Les variations des différentes caractéristiques étudiées ne sont explicables, la plupart du temps, qu'en fonction de la marée. S'il n'y avait pas de marées dans les estuaires, leur physionomie serait totalement changée et l'on ne pourrait plus observer les variations de grande amplitude qui ont été notées dans les précédents chapitres. Bien entendu, au phénomène de marée se superpose toute une série de facteurs qui sont loin d'être négligeables, mais malgré tout secondaires : débit fluvial, vent, insolation et activité photosynthétique, etc.

Au cours des pages précédentes, on a étudié séparément les variations de salinité, de température, de pH, de teneur en oxygène en des points particulièrement choisis dans chaque estuaire. Souvent, et notamment en ce qui concerne le pH, la teneur en oxygène dissous, la teneur en suspensions, on s'est trouvé gêné pour fournir une explication rationnelle de leurs variations au cours de la marée. Cette difficulté vient, certes, d'une part, du trop petit nombre de mesures et souvent du manque de données concernant les facteurs de variation, mais c'est surtout aussi parce que l'on raisonne le plus souvent comme si l'on avait affaire à un milieu immobile.

Lorsque l'on dit, par exemple, que le pH varie avec l'augmentation de salinité, on a tendance à penser qu'il s'agit d'un volume d'eau déterminé immobile dont on suit les variations de pH à mesure que l'on y ajoute des sels. En réalité, il n'en est rien, car l'eau que l'on étudie à chacune des prises est différente, par son origine, de la précédente. Il y a remplacement successif continu, par suite du dynamisme de la marée. Si l'on songe que l'eau qu'on étudie au cours de la marée n'est jamais la même, il n'y a plus lieu de s'étonner des variations parfois surprenantes et difficilement explicables, de certaines données physicochimiques. Ainsi, par exemple, si la teneur en oxygène dissous est de 7 mgr.-l., 3 heures avant la basse mer, en un certain point, et qu'à l'heure suivante cette teneur est de 8 mgr.-l., il ne faut pas conclure qu'il y ait eu augmentation de la teneur en oxygène de l'eau par suite des conditions locales d'éclairement, de faune ou de flore, mais simplement qu'une eau plus oxygénée est venue remplacer une eau moins oxygénée. Il faudrait, pour interpréter exactement, connaître tous les facteurs qui peuvent modifier la teneur en oxygène du volume d'eau considéré tout au long du parcours qu'il effectue au cours de la marée depuis son origine en mer (comme on l'a vu, ce parcours est long et atteint plusieurs kilomètres). Il va sans dire, cependant, que les facteurs tels que : type de temps, densité et composition du plancton, jouent toujours leur rôle pendant ce parcours et qu'ils se superposent aux facteurs locaux : de là, toute la complexité des phénomènes observés. Le meilleur moyen, pour pouvoir donner des interprétations correctes, est, dans le cas des estuaires, la construction, pour toutes les variables physicochimiques étudiées, de courbes du type des isohalines. Si l'on possédait, pour chaque estuaire, des graphiques donnant les isothermes, les isohalines et, si je peux me permettre ces termes, des iso-pH et des iso-oxygène, etc..., on pourrait suivre, au sein même d'un volume d'eau déterminé, les variations qu'il subit pendant son parcours durant la marée. Peut-être même pourrait-on construire des courbes d'anomalies, du type de celles qui s'emploient couramment en météorologie, les isallobares, c'est-à-dire des courbes joignant les points d'égale variation. C'est là, à mon avis, le seul moyen que l'on ait si on désire vraiment saisir un peu de la complexité des phénomènes qui ont été ici abordés. Mais c'est un travail de très longue haleine, demandant un nombre considérable

de mesures en de très nombreux points d'un estuaire et aux différentes époques de l'année.

Ces lignes concernent seulement l'interprétation des faits, car il ne reste pas moins exact qu'en un point de l'estuaire, les variations du milieu physicochimique restent telles qu'on les observe : la salinité croît avec la marée, le pH croît avec la marée, etc... Et si le physiochimiste est insatisfait par ces résultats bruts, le biologiste, dont le but est de connaître le milieu dans lequel vit la faune et la flore, possède là des données suffisantes. En ce qui concerne le géologue, on verra, dans un chapitre ultérieur, que ces résultats bruts ne lui suffisent pas pour interpréter les phénomènes de sédimentation.

Peut-on, malgré l'impuissance où l'on est de donner des interprétations détaillées des variations du milieu physico-chimique d'un estuaire, tenter de résumer brièvement ce que les nombreuses mesures effectuées apprennent d'important ?

Il apparaît tout d'abord que les estuaires, dont il a été question dans ce travail, se ressemblent beaucoup par les variations de leur milieu au cours de la marée. Evidemment il est bon de distinguer auparavant les estuaires du type Aulne, Penzé et Bou-Regreg, des estuaires du type Seine, Loire et Gironde. Dans les premiers, tout au moins en été (étiage), la zone dans laquelle se font sentir des variations de salinité, ou plus généralement des variations physicochimiques, correspond à peu près exactement à la zone dans laquelle se fait sentir la marée. On dira, pour reprendre les termes utilisés, que la marée de salinité (marée physicochimique) correspond à la marée dynamique. Dans les seconds, le débit fluvial est tel que la marée de salinité ne se fait pas sentir aussi loin que la marée dynamique. Ainsi, les travaux de B. Rajčević ont montré que la marée de salinité ne se fait sentir dans l'estuaire de la Seine que jusqu'à Tancarville, tandis que l'onde mécanique de marée est sensible quelques kilomètres encore en amont de Rouen; en Loire, j'ai montré qu'à partir de Paimbœuf, et jusqu'à Nantes, l'eau de l'estuaire ne subissait pas de variation de salinité; et, en Gironde, L. GLANGEAUD a fait ressortir des phénomènes analogues.

Cette distinction est nécessaire, car il est évident que la physicochimie du milieu ne variera pas avec la même amplitude, et quelquefois pas du tout (salinité) dans la zone où la marée est seulement dynamique. On ne parlera ici que de la zone où les variations du milieu physicochimique avec la marée sont notables (zone de marée de salinité).

Ce qui ne ressort peut-être pas de la lecture des précédents chapitres, c'est la liaison, parfois très étroite, qui existe entre les différentes variables. La note dominante de ce milieu, c'est, bien entendu, la salinité; on peut presque dire que la plus ou moins grande proportion d'eau de mer en un point suffit à déterminer un milieu qui a tendance à se rapprocher du milieu marin. Mais il est bon de distinguer toujours, dans un estuaire, les deux saisons opposées : hiver (crues, ou forts débits fluviaux) et été (étiage, faibles débits fluviaux). Certes, en été, surtout dans les estuaires des fleuves d'une certaine importance (Seine, Loire), les eaux sont-elles plus ou moins stratifiées en fonction de leur densité, mais cette stratification est souvent insignifiante et les variations sont à peu près homogènes du fond à la surface. En hiver, au contraire, les variations sont très différentes au fond et en surface : il peut arriver, comme à Trégarvan, dans l'Aulne, qu'entre les eaux du fond et de surface, il y ait une différence de température de plusieurs degrés, une différence de salinité de près de 25 ‰, et cela à presque tous les moments de la marée.

L'homogénéité du milieu disparaît alors complètement et il existe des zones de discontinuité qui séparent un domaine para-fluvial en surface. Il semble que cette constatation

doive avoir une grande importance pour le biologiste et même pour le géologue, comme on le verra plus loin.

Même dans ces domaines ainsi délimités, le milieu varie avec la marée et très souvent dans le même sens (ceci est visible à Trégarvan pour la salinité et la température).

D'une façon très générale, trop schématique peut-être, on peut dire, par exemple, qu'à mesure que le flot se fait sentir dans un estuaire : la salinité et la température augmentent (caractère hivernal), le pH varie, la teneur en suspensions diminue (caractère de la zone proche de l'embouchure), la transparence augmente. Les mesures effectuées à la Tour Hassan, le 16 septembre 1940 (Bou-Regreg) sont assez démonstratives à ce sujet (fig. 71) ; c'est pourquoi j'ai groupé ensemble, sur la figure, les différentes variables étudiées. En réalité, comme on l'a vu, les variations de tous ces facteurs sont infiniment plus complexes et d'une régularité moins schématique. Mais cet exemple montre bien cependant que le caractère dominant dans la physicochimie des eaux d'estuaire, c'est la pénétration de l'eau de mer en rapport avec l'onde de marée.

En résumé, dans les précédents chapitres ont été étudiées, en fonction de la marée : la répartition et les variations de température, de salinité, du pH, de l'oxygène dissous, de la teneur en suspensions et de la transparence.

Mais toutes les mesures et les résultats obtenus sont insuffisants pour comprendre le mécanisme intime qui conduit à l'existence d'eaux saumâtres, pour saisir les causes réelles de la variation ou de la stabilité du pH ou de la teneur en oxygène dissous. Un trop grand nombre de facteurs, tant physiques que biologiques, interfèrent dans un estuaire pour que les causes déterminantes de ces phénomènes apparaissent clairement, dès maintenant. Partout, je me trouve arrêté pour aboutir à des conclusions d'ordre vrai-

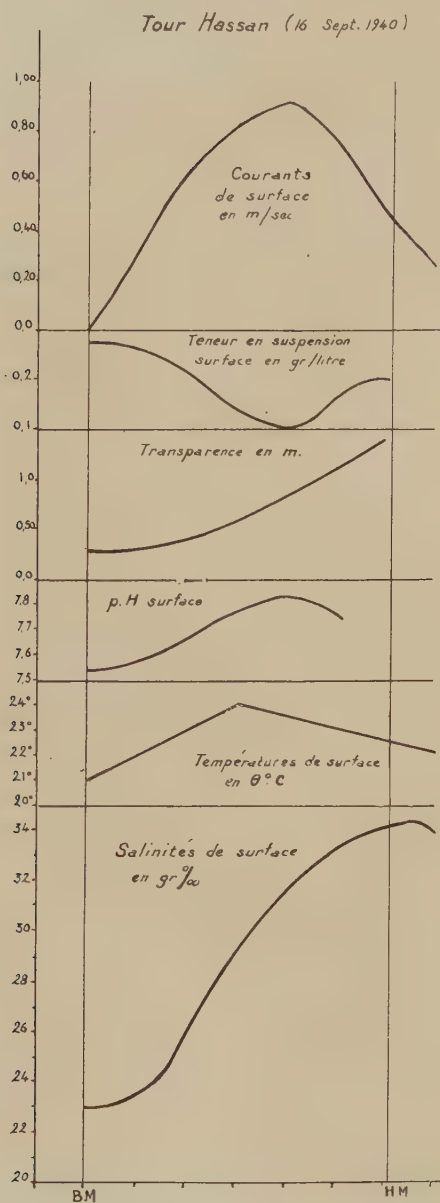


FIG. 71. — Variations synchroniques des différents facteurs physico-chimiques dans l'estuaire du Bou-Regreg (Tour Hassan).

ment général. La complexité du milieu fluvio-marin est infinie et on manque encore de trop de données pour s'en faire une idée exacte. Mon seul espoir est que ces pages pourront, malgré leur insuffisance, servir de cadre à des recherches ultérieures plus approfondies.

*Troisième Partie.* — LES DÉPÔTS D'ESTUAIRECHAPITRE PREMIER. — INTRODUCTION :  
SÉDIMENTS MONODISPERSÉS, POLYDISPERSÉS ET COMPLEXES

La deuxième partie vient de donner une idée — encore très imprécise d'ailleurs — de ce qu'est le milieu fluvio-marin, et l'image qui demeure peut-être le plus fixée à l'esprit est celle d'un complexe où interviennent un très grand nombre de facteurs, tant dynamiques que physicochimiques, soumis à de grandes variations dans le temps (à toutes les échelles) et dans l'espace. Il n'est pas toujours commode de définir les sédiments qui se déposent dans ce milieu.

Les dépôts actuels répartis dans les estuaires sont nécessairement des formations meubles non cimentées (le terme de ciment étant pris dans le sens que les géologues lui attribuent). Par suite de la marée, une grande partie de ces dépôts est mise à jour au cours du jusant; c'est ce que l'on a appelé la *slikke* qui, dans une certaine mesure, peut être comparée à l'estran des plages marines littorales. Il apparaît donc, tout au moins par ce premier caractère, que les dépôts d'estuaire sont plus marins que fluviaux. Il existe pourtant une zone axiale de l'estuaire (chenal) qui ne découvre jamais. On peut penser, *a priori*, que les dépôts qui découvrent et ceux qui ne découvrent pas sont différents au moins par la dimension de leurs éléments constitutants. Enfin, la zone supérieure à l'estran (*slikke*), et qu'on peut assimiler, dans une certaine mesure, à la haute plage, est composée de dépôts qui ont un aspect encore très différent, qu'il s'agisse du *schorre* ou des éboulis caillouteux.

La première question qui se pose, dans ces conditions, est de classer par un procédé quelconque ces sédiments, de manière à pouvoir leur donner un nom. On n'hésite pas à dire que le sable de Fontainebleau est un sable : c'est pourtant une détermination macroscopique. On n'hésite pas davantage à appeler argile, les argiles oxfordiennes de Villers-sur-Mer. De même les géologues n'ont pas hésité à donner le nom d'argile aux sédiments d'estuaire, qui n'ont pas l'aspect macroscopique du sable, mais grossièrement celui de l'argile. Cette erreur de diagnostic, sur laquelle on reviendra plus loin, est essentiellement due à ce qu'ils ne les ont étudiés, ni du point de vue minéralogique, ni du point de vue dimensionnel. Pourtant, les travaux océanographiques anciens (MURRAY [1891-1893], COLLET [1908], THOULET [1901], etc...) n'avaient jamais décrit de vraies argiles, mais des vases « terrigènes » où se rencontraient des éléments d'origine, de nature et de dimensions variées. L'attention aurait donc dû être attirée et les dépôts d'estuaire étudiés d'un peu plus près par les géologues, d'autant plus que, pour les océanographes et les biologistes, ils n'étaient qu'un aspect des vases marines terrigènes (LLOYD, 1931; MOORE, 1932).

A côté d'une description macroscopique, la description microscopique s'impose aussi bien pour les dépôts actuels que pour les dépôts des mers anciennes (roches sédimentaires). Mais ce n'est pas suffisant, car le mode de dépôt, le comportement physique, le comportement physicochimique, l'évolution, dépendent non seulement de la qualité des éléments constitutants, mais aussi de leurs dimensions. Une analyse dimensionnelle des dépôts actuels est donc nécessaire (analyse granulométrique). C'est ce que les océano-

graphes (THOULET) et les pédologues avaient compris depuis longtemps. Enfin, si besoin est, l'analyse chimique, l'étude physique et physicochimique du sédiment donnent les arguments nécessaires à une description détaillée. J'ai tenté de suivre ici cette méthode. Mais, avant d'entrer dans l'exposé des résultats, je voudrais préciser quelques termes empruntés au langage physicochimique.

Un sédiment — pas seulement fluvio-marin — peut être monodispersé, polydispersé ou complexe.

Un sédiment *monodispersé* est, par définition, constitué par des éléments ayant tous la même dimension. Un sédiment *polydispersé* est constitué par des éléments de dimensions variées et en proportions variables. Dans les deux cas, les éléments peuvent être de nature très variée (quartz, calcite, tourmaline, grenats, zircon, micas, etc...). Ces deux termes seront utilisés pour désigner tous les sédiments, tant que l'on se place du point de vue strictement dimensionnel.

Dans la nature, on ne rencontre évidemment pas de sédiment rigoureusement monodispersé. On a donc toujours affaire à des sédiments polydispersés. Mais les éléments peuvent cependant ne varier que dans des limites assez étroites et offrir des propriétés constantes entre ces limites. Si ces propriétés offrent de brusques discontinuités à partir d'une certaine dimension, on a la possibilité de classer, d'une façon commode, les éléments d'un sédiment en *phases*. C'est le principe même de la classification proposée par J. BOURCART (1941, 4), pour les matériaux meubles. Le mot *phase* n'a naturellement pas, comme l'indique l'auteur, son sens thermodynamique habituel.

Ainsi, les coupures de J. BOURCART sont les suivantes :

| Phases            | Dimension des éléments               |
|-------------------|--------------------------------------|
| Cailloux.         | > 2 mm.                              |
| Sables, } sables. | 2 mm. — 0 mm. 1.                     |
| Sablons, }        | 0 mm. 1 — 0 mm. 02.                  |
| Poudres.          | 0 mm. 02 — 0 mm. 001.                |
| Précolloïdes.     | 0 mm. 001 — 0 mm. 0001 (0,1 $\mu$ ). |
| Colloïdes.        | < 0,1 $\mu$ .                        |

Dans la nature, on peut trouver des sédiments qui, s'ils ne sont pas monodispersés, sont tout au moins *monophasés*; et j'étudierai ceux des estuaires dans le prochain chapitre. Mais, très souvent aussi, les sédiments polydispersés sont également *polyphasés* et c'est le cas en particulier des vases d'estuaire.

Comme on le verra, la vase n'est pas un sédiment inerte, ce n'est pas non plus un sédiment inorganique : à la polydispersion dimensionnelle vient s'ajouter une variété d'ordre chimique, physicochimique et même biologique. C'est pourquoi, pour un sédiment de ce type, le terme de polydispersé ne suffit plus et il me semble que celui de *complexe* lui convient mieux.

Je consacrerai donc un chapitre particulier au sédiment complexe qu'est la vase. Toutes les propriétés de la vase disparaissent par dessiccation : son existence et son comportement sont liés à sa teneur en eau. La vase desséchée est morte; mais cependant encore, dans une certaine mesure, comme certains protozoaires, qui, enkystés, peuvent résister à de grandes variations de milieu et reprendre le cycle vital en présence d'eau, elle peut aussi, par réimbibition (si sa structure n'a pas été détruite), reprendre son aspect habituel. C'est pourquoi il semble que le terme de complexe lui convienne parfaitement.

## CHAPITRE II. — LES SÉDIMENTS MONOPHASÉS

Les dépôts d'estuaire constituent, à de très rares exceptions près, des ensembles toujours meubles. Ils ne sont jamais cimentés. Par ce caractère négatif, ils se rapprochent de tous les sédiments marins actuels et aussi des sols. Océanographes et pédologues ont tenté, à plusieurs reprises, de classer rationnellement de telles formations; le point de départ de ces classifications étant tantôt la dimension des éléments considérés, tantôt leur origine, tantôt leur nature. Jusqu'à présent, les classifications de ce type (THOULET, ATTERBERG [1905], TWENHOFFEL [1932], les pédologues DEMOLON [1938]) affectaient de noms variés, sans trop de raisons, semble-t-il, les éléments compris entre certaines limites assez mal définies : ainsi argile (TWENHOFFEL), limon (pédologue), poussière (KOPETZKY), vase (THOULET), correspondent, par exemple, à des éléments de diamètre voisin (en général inférieur à 0 mm. 02).

JACQUES BOURCART a fait le tour de ces classifications et en a proposé une qui offre les avantages de la simplicité des termes qui sont, par ailleurs, bien définis par un faisceau de propriétés physiques (perméabilité, adhésion à sec ou à l'eau, adsorption, mode de transport, etc...). Elle a donc été adoptée dans ce travail.

1. — Cailloux (éléments  $> 2$  mm.).

Ils ne sont pas très fréquents dans les estuaires. Pourtant, il est nécessaire d'établir une subdivision en galets dont un des axes dépasse 20 mm., et en graviers compris entre 20 mm. et 2 mm.

*Les galets.* — C'est une formation très rare, mais que l'on rencontre cependant parfois et principalement dans la partie haute des rives, notamment quand le versant est constitué par une roche dure et stratifiée. C'est le cas pour l'estuaire de l'Aulne où les versants sont faits de quartzites ou de schistes qui se délitent sous l'action des eaux météoriques.

Les rives sont, la plupart du temps, bordées par des galets parallélépipédiques, très peu roulés, dont les angles sont à peine émoussés. Ce ne sont certes pas des galets transportés et amenés par le fleuve ou la mer, mais de simples produits de la désagrégation de la roche en place. Ce serait, à mon avis, une erreur que de considérer ces éléments comme étant une caractéristique des formations d'estuaire.

Le schorre, ou la terrasse, est constitué par des matériaux meubles en général très fins, qui se dessèchent et se fendillent quand ils ne sont pas régulièrement recouverts par de l'eau. Ces fentes de dessiccation sont accentuées par les racines de la végétation et il s'isole ainsi des blocs qui, lorsque le talus est attaqué par la marée montante, se détachent. Ils sont alors repris et non désagrégés par les eaux de l'estuaire qui les roulent et arrivent à leur donner la forme de véritables galets allongés, mais peu aplatis. Comme le substratum sur lequel ils reposent n'est pas rugueux, car il s'agit de vases, ces galets conservent cette forme et on peut en trouver assez fréquemment sur les hautes parties des slikkes. Ce sont de véritables galets de vase : ils sont persistants, car étant recouverts périodiquement par l'eau, ils ne subissent pas de dessiccation suffisante pour les morceler. J'ai ainsi pu en ramasser sur la slikke des estuaires de l'Aulne, de la Seine, de la Loire, etc...

*Les graviers.* — Il est rare de trouver une zone constituée uniquement par des graviers. En général, ils sont plus ou moins intimement mélangés aux formations vaseuses. Il arrive cependant, comme c'est le cas pour l'Aulne, que par un processus identique, mais poussé plus loin, à celui qui conduit à la formation de galets, on puisse trouver d'importantes zones de graviers dans les parties hautes des rives. Mais, pas plus que les galets, il ne me semble possible de les attribuer à un dépôt consécutif à un transport par les eaux de l'estuaire. Ce sont aussi des formations *in situ*.

C'est ainsi que, sur la rive gauche de l'estuaire de l'Aulne, près du bac de Dinéault, existe une haute plage constituée de graviers auxquels se mêle d'ailleurs un peu de sable. La représentation graphique (fig. 72) (dont le mode de construction sera donné au paragraphe suivant) montre bien la prépondérance des éléments supérieurs à 2 mm.

Il arrive souvent qu'à la vase de la slikke soient incorporés de tels graviers qui descendent de la haute plage entraînés par l'eau (slikke de Trégarvan, par exemple):

Naturellement, les galets, comme les graviers, sont essentiellement des morceaux de roche et ce n'est que rarement qu'ils sont constitués par un seul minéral (quartz).

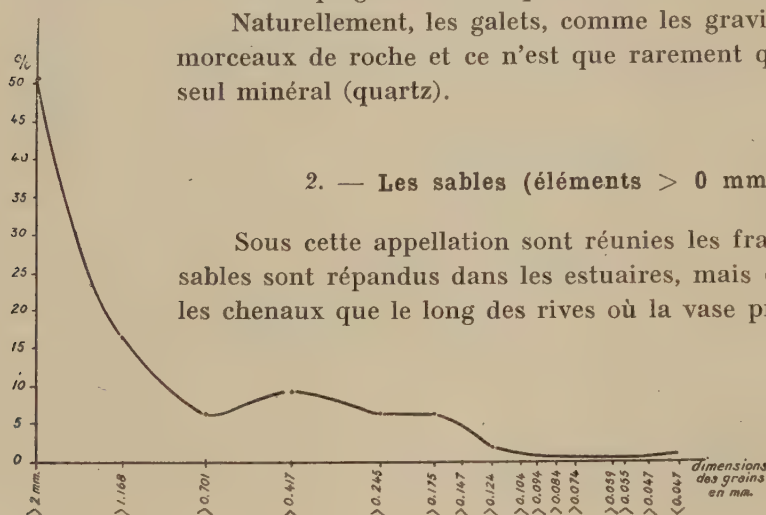


FIG. 72. — Courbe de fréquence granulométrique d'un dépôt de graviers (Bac de Dinéault); estuaire de l'Aulne.

des bancs médians. Dans l'estuaire du Bou-Regreg, les sables sont essentiellement localisés à l'embouchure où ils sont exclusifs. Le sable, peut-être encore plus que la vase, intéresse les ingénieurs chargés de l'entretien des chenaux navigables. Son origine doit être recherchée, ainsi que ses conditions de dépôt. Dans ce but, j'ai utilisé, pour quelques sables de l'estuaire du Bou-Regreg et de l'estuaire de la Loire, l'analyse granulométrique détaillée.

L'analyse granulométrique des sédiments meubles a déjà fait l'objet, en France, d'un assez grand nombre de travaux et de publications. On peut citer, dans l'ordre : DELESSE (1871), J. THOULET (1901), M. PRENANT (1932), J. BURCART (1937), A. RIVIÈRE (1937), qui ont indiqué trois modes différents de représentation : courbes cumulatives, courbes de fréquence, représentation en coordonnées polaires. Plusieurs chercheurs ont, par la suite, adopté l'une de ces représentations pour exprimer la fréquence granulométrique dans les sables. Pour moi, la plus parlante d'entre elles étant la courbe de fréquence, je l'ai utilisée. L'analyse proprement dite se fait à l'aide de tamis et la technique est bien connue en océanographie depuis THOULET. Je me suis servi d'une colonne de 15 tamis dont les mailles de plus en plus fines vont de 1 mm. 981 à

0 mm. 047. Elle couvre donc à peu près complètement le domaine des sables. Chaque fraction du sédiment (on part d'un poids connu) est pesée, après secouage, et on ramène à 100. Ce qui permet alors d'obtenir les courbes du type de celles qui sont données ici (abscisse en échelle logarithmique).

1. LES SABLES DE L'EMBOUCHURE DU BOU-REGREG (1). — Neuf échantillons ont été recueillis à la drague; les points exacts de prélèvements sont mentionnés sur la carte (fig. 73). Leur analyse granulométrique permet immédiatement de distinguer deux familles de courbes (fig. 74 et 75) : celles du groupe I, qui montrent deux maxima : le premier avec des grains de diamètre moyen égal à 0 mm. 331, c'est le plus important; le deuxième avec des grains de diamètre moyen égal à 0 mm. 147; celles du groupe II, qui montrent aussi deux maxima : le premier avec des grains de diamètre moyen égal à 0 mm. 245, c'est le plus important.

En se reportant à la classification générale donnée plus haut, on voit que tous ces échantillons sont presque entièrement constitués par de vrais sables, c'est-à-dire de grains dont la dimension n'est pas inférieure à 0 mm. 1. Les sablons sont inexistant.

On peut admettre, dans une certaine mesure, que le maximum le plus important du groupe I correspond au plus petit maximum du groupe II; d'autre part, le maximum secondaire du groupe I est aussi le maximum principal du groupe II.

De ces considérations, on peut, semble-t-il, tirer une conclusion : c'est que l'alimentation en sables dans l'embouchure, si elle n'a pas deux origines distinctes, correspond tout au moins à deux régimes hydrodynamiques différents.

Si, maintenant, on examine la répartition de ces échantillons sur la carte, on est frappé de constater que ceux du groupe I ont été recueillis près de la rive de Salé, et que les autres sont pris soit dans le chenal, soit du côté de Rabat.

Tout porte à croire (voir deuxième partie) que le courant marin littoral en flot est dirigé SW.-NE. et que, par conséquent, par mauvais temps, il alimente la plage de Salé en sables dont la dimension est en moyenne égale à 0 mm. 331; par contre, en période de crues, le Bou-Regreg transporte également des sables qui, arrivés dans l'avant-port, se déposent par suite de la diminution de vitesse du courant (épanouissement des lignes de flux) ; la dimension moyenne des grains est de 0 mm. 147.

Mais l'avant-port est constamment le siège de houles assez fortes venant du large et elles remanient les dépôts de telle manière, qu'en tous points, s'effectuent le mélange des



FIG. 73. — Carte des points de prélèvement des sables à l'embouchure du Bou-Regreg.

(1) Je saisis, ici, l'occasion de remercier le Directeur et le personnel de la Société des Ports marocains, qui ont bien voulu me faciliter, à tous égards, le travail matériel dans cet estuaire.

Les sables étudiés ont été dragués en janvier 1941 et ils offrent l'intérêt — dû aux circonstances — d'être exactement à leur place, sans que des dragages soient venus bouleverser leurs conditions de dépôt. En effet, depuis 1939, aucun dragage n'avait été entrepris pour entretenir le chenal d'accès au port de Rabat.

deux sortes de sables : c'est pourquoi l'on trouve partout les deux maxima, bien que, du côté Salé, ce soit le maximum le plus grossier (sans doute d'origine marine) qui domine et que, du côté Rabat et dans le chenal, ce soit le maximum le plus fin (sans doute d'origine fluviale).

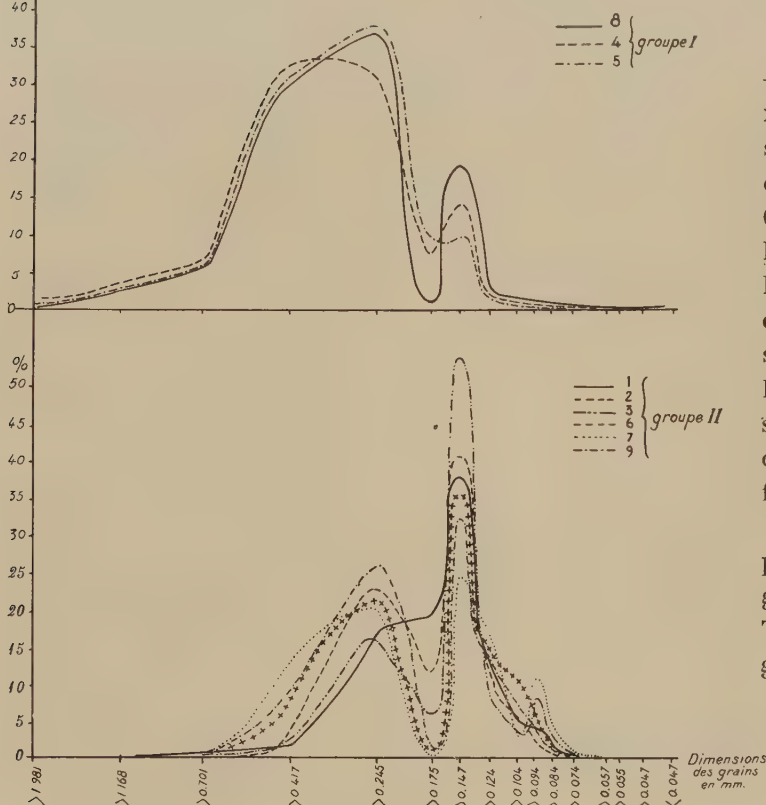


FIG. 74.

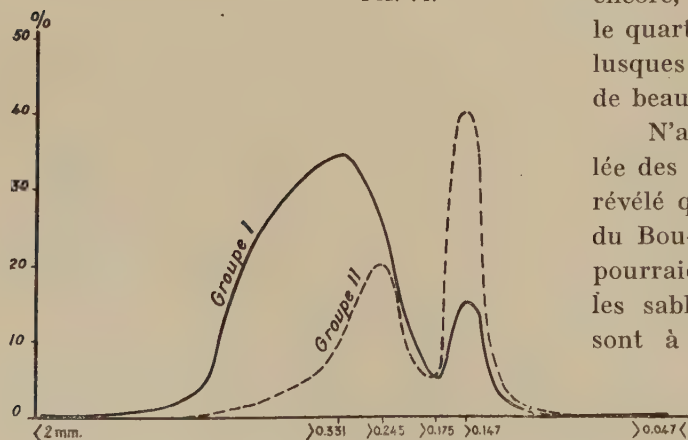


FIG. 75.

FIG. 74 et 75. — Courbes de fréquence granulométrique des sables recueillis à l'embouchure du Bou-Regreg.

#### Examen microscopique.

— Ces sables se sont tous montrés de composition sensiblement identique : grains de quartz roulés et non roulés (aigus), grains calcaires roulés, quelques rares minéraux lourds, abondance de débris de coquilles de mollusques, spicules d'éponges, débris de bryozoaires, radioles d'oursins, rares foraminifères, quelques débris de charbon et de fer concrétionné.

Il n'y a pas de distinction possible entre les sables du groupe I et ceux du groupe II. Toutefois, dans ceux du groupe I, les éléments quartzeux dominant (grains roulés et aigus), car ce sont ceux qui constituent les grains les plus gros. Mais

encore, dans tous les échantillons, ce sont le quartz et les débris de coquilles de mollusques qui, statistiquement, prédominent de beaucoup.

N'ayant pas poursuivi l'analyse détaillée des minéraux lourds, ceux-ci n'ont rien révélé quant à leur origine. Et dans le cas du Bou-Regreg, on peut se demander s'ils pourraient révéler quoi que ce soit, car les sables marins arrachés au littoral le sont à des formations dunaires quaternaires (plus ou moins consolidées) qui ont, peut-être, comme point d'origine, le même bassin versant, que les sables fluviaux actuels, amenés par l'oued.

*Remarque.* — Je ne voudrais pas parler des sables de l'estuaire du Bou-Regreg sans citer les recherches non publiées de JACQUES BOURCART sur ces mêmes sables. Elles ont été entreprises bien avant les miennes (1933). Des prélèvements effectués en périodes de crues et en période d'étiage lui ont montré l'existence de deux maxima (les mêmes que ceux des courbes ici reproduites). Fait intéressant, le maximum le plus fin s'accroissait notablement en périodes de crues, ce qui est une preuve de la part que prend l'oued à fournir un matériel sableux plus fin que celui qui vient de la mer.

Nos prélèvements et leur interprétation concordent donc entièrement.

2. LES SABLES DE L'ESTUAIRE DE LA SEINE. — B. RAJČEVIĆ (1938), après VOLMAT, a étudié les sables qui se déposent à l'heure actuelle à l'embouchure de la Seine, où ils forment des bancs, d'ailleurs mobiles, qui déterminent des changements assez fréquents du chenal de navigation. Ces sables se rencontrent, dans le chenal, jusqu'à Rouen.

Huit prélèvements effectués par B. RAJČEVIĆ dans le chenal, entre le Havre et Rouen, ont été étudiés du point de vue granulométrique et minéralogique. Les courbes ne présentent qu'un maximum accusé (aux environs de  $100 \mu$ ). Le pourcentage en grains fins ( $104 \mu$ ) est maximum à Berville, entre le Havre et Tancarville. L'auteur en conclut que c'est le point d'usure maximum.

L'analyse minéralogique lui a révélé que les grains marins sont essentiellement quartzeux et les grains fluviaux constitués par du quartz, mais aussi, très fréquemment, par de la calcite. Les sables prélevés montrent un pourcentage de calcite diminuant vers l'aval à partir de Berville, où commence alors la prédominance du quartz marin.

Ces deux exemples (celui du Bou-Regreg et celui de la Seine) montrent deux cas où l'examen des courbes granulométriques conduit à des conclusions hydrodynamiques intéressantes. Mais si, dans le premier, cette analyse physique indiquait deux origines différentes (deux maxima), par contre, l'analyse minéralogique n'était pas très significative. Au contraire, dans le cas de la Seine, c'est cette dernière qui indique l'origine du matériau, tandis que les courbes, toutes à un maximum voisin, ne sont pas très parlantes.

3. LES SABLES DE L'ESTUAIRE DE LA LOIRE. — Ils sont fréquents dans cet estuaire, peut-être plus que dans n'importe quel autre et, ceci, pour deux raisons bien simples : 1° le bassin versant de la Loire fournit par ses roches éruptives (Massif central), et surtout par son granite, un contingent très élevé de sables, qui d'ailleurs sont abondants dans tout le cours de la Loire où ils ont été étudiés, notamment par PARTIOT (1871); 2° La côte marine voisine de l'embouchure est également riche en sable, toujours d'ailleurs pour la même raison (roches cristallines).

A l'heure actuelle, sauf en certains points du chenal, on ne trouve guère de sables entre Nantes et Donges; mais, par contre, en amont de Donges et jusqu'à l'embouchure, ils forment des bancs médians qui séparent les deux chenaux de navigation : l'ancien et le nouveau.

Je n'ai pas encore exécuté l'analyse granulométrique de ces sables qui, au premier examen microscopique, se sont révélés essentiellement quartzeux. Mais dans le cas de la Loire, plus qu'ailleurs, s'impose une analyse détaillée des minéraux lourds qui donnera des indications précieuses sur leur origine.

4. LES SABLES DE L'ESTUAIRE DE LA PENZÉ ET DE L'ESTUAIRE DE L'AULNE. — On ne trouve que relativement peu de sable dans les estuaires bretons, ce qui s'explique d'ailleurs assez facilement quand on sait combien est faible le débit fluvial, même en hiver.

Lorsqu'on en trouve, ils sont localisés dans les chenaux et plus particulièrement dans la partie essentiellement maritime de l'estuaire. J'ai pu aussi en draguer en face du village de Trégarvan, dans l'Aulne et en quelques autres points. Mais je voudrais surtout parler d'un gisement sableux assez remarquable, rencontré dans cet estuaire.

A 500 m. en amont de Trégarvan, sur la rive gauche de l'estuaire (slikke), sous une couche de vase de 20 cm. d'épaisseur environ, on trouve successivement : 1 lit de 10 cm. d'épaisseur de sable de coquilles mêlé à de la vase; 1 lit plus épais de 40 cm. de sable de coquilles pur; 1 lit de 10 cm. de brindilles de bois; 1 lit de 20 cm. de sable de coquilles mêlé à de la vase; après quoi, on retrouve de la vase typique.

Il me faut maintenant préciser que ce que j'appelle sable de coquilles était uniquement composé de coquilles entières de très jeunes *Cardium edule* excessivement minces. Ces coquilles, très légères, et ces brindilles de bois sous-jacentes, font penser qu'il s'agit là d'un dépôt amené par flottaison. Mais quelle peut être son origine exacte ? Localement, ce gisement curieux est intéressant du fait que, dans ce pays aussi peu calcaire que possible, cette masse de coquilles sert d'amendement aux habitants du village de Trégarvan.

Dans l'estuaire de la Penzé, ou plus exactement entre la pointe de Carantec et Roscoff, on trouve du sable : ceci n'est pas étonnant, car on est en plein domaine marin. Le long du rivage, on trouve des plages (Penpoull) et, dans le chenal de la Penzé, du sable quartzeux, mais très mêlé à du moerl vivant ou mort. S'il n'était difficile d'accès (dragages nécessaires), il pourrait servir d'amendement pour les champs de la région.

5. LES SABLES DE L'ESTUAIRE DE LA GIRONDE. — Ils sont fréquents et ont été étudiés par L. GLANGEAUD (1938, 2) qui a donné quelques courbes granulométriques d'échantillons provenant de l'estuaire de la Gironde et du plateau continental. Elles présentent généralement un seul maximum.

Les bancs de sable, dans la partie aval de l'estuaire, subissent des déplacements complexes. Les études pétrographiques précisent qu'une grande partie du matériel sableux, transporté sur le plateau de Cordouan, est fourni par le stock sableux, marin et éolien, qui occupe la côte gasconne, entre 0 et 8 m. de profondeur.

6. REMARQUES GÉNÉRALES SUR LES SABLES D'ESTUAIRE. — Des études exécutées jusqu'à ce jour, il semble ressortir que les sables d'estuaire ont des origines multiples, en première analyse, et qu'elles peuvent se retrouver plus ou moins nettes dans les courbes granulométriques (cas du Bou-Regreg). L'existence de plusieurs maxima peut donc être déjà une indication pour diagnostiquer, en présence d'une formation sableuse, une origine fluvio-marine. En effet, à ces courbes à plusieurs maxima, semblent s'opposer — mais je ne voudrais pas généraliser hâtivement — les sables plus uniformément calibrés correspondant à des courants d'eau ou de vent plus constants. A l'appui de ceci, mais sans vouloir en faire une règle générale, je reproduis ici deux types de courbes assez caractéristiques (fig. 17 et 18) : l'un concerne les sables marins recueillis suivant la pente de l'estran de la Plage de Pen Hat (Camaret), avec un seul maximum très accusé pour les particules comprises entre 0 mm. 245 et 0 mm. 275; l'autre, les sables dunaires d'origines variées, étudiés par M<sup>me</sup> CLAUDE LALOU (1939) : bien que le maximum ne soit pas constant pour tous les échantillons, il est cependant remarquable de constater l'allure générale très semblable des différentes courbes, allure qui s'oppose aux sables marins de Camaret.

7. MÉTHODE ET PLAN D'ÉTUDE DES SABLES DANS LES ESTUAIRES. — Les résultats qui viennent d'être exposés sont insuffisants. Il faut que des études systématiques soient poursuivies. Un plan de travail pourrait être proposé :

Prélèvements d'échantillons (en tous points où existent des formations sableuses dans l'estuaire) en crues et en étiage, par faible et fort coefficient de marée. — Prélèvements de sable littoral avoisinant l'estuaire (sable de plage). — Prélèvements d'échantillons de sable du Plateau continental. — Prélèvements d'échantillons du sable dunaire s'il existe. — Prélèvements d'échantillons du sable fluvatile immédiatement en amont de l'estuaire, en crue et en étiage. — Prélèvements d'échantillons de toutes les formations géologiques du Bassin versant et du littoral pouvant fournir, par érosion, du sable.

Sur tous ces échantillons, il faudra effectuer une analyse granulométrique détaillée et une analyse minéralogique comportant la détermination du faciès de l'ensemble suivant la méthode proposée par A. CAILLEUX (1943) (morphoscopie), l'établissement du spectre des minéraux lourds et la détermination des débris d'organismes.

L'origine des sables pourra, dans ces conditions, être fixée avec le minimum d'erreurs.

L'application de ce programme est en cours, en ce qui concerne les sables de l'estuaire de la Loire.

8. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SABLES. — A côté de l'étude granulométrique et minéralogique, on peut essayer de caractériser les sables par l'étude de certaines de leurs propriétés physiques d'ensemble.

Il y a longtemps, par exemple, que, pour THOULET, la pente du talus est caractéristique du matériau considéré, à condition de distinguer, bien entendu, la pente sous l'eau (matériau totalement imbibé) et la pente du matériau sec. De même, le tassement (volume occupé) à sec et imbibé d'eau a fait l'objet d'intéressantes observations.

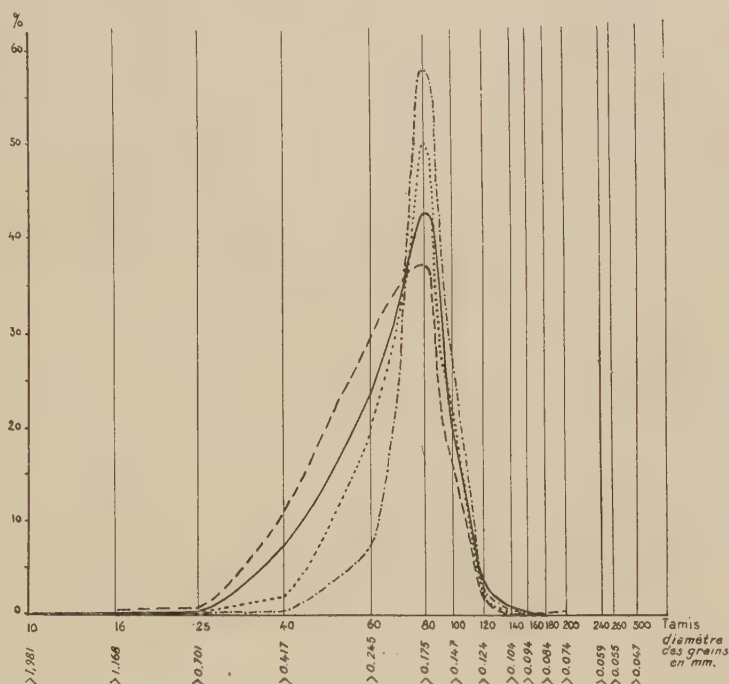


FIG. 76.

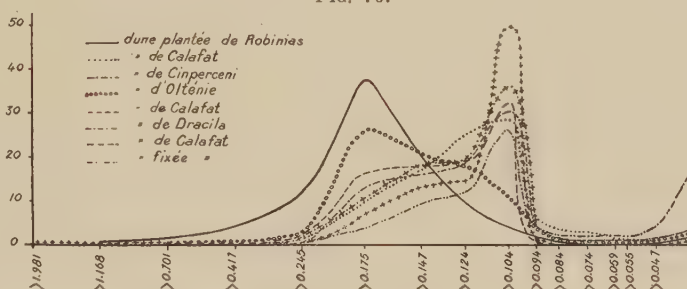


FIG. 77.

FIG. 76. — Courbes de fréquence granulométrique de sables d'une plage marine (Camaret).

FIG. 77. — Courbes de fréquences granulométriques de sables de dunes (d'après M<sup>lle</sup> C. LALOU, 1939).

Les biologistes eux-mêmes se sont occupés de ces propriétés, qui peuvent être de précieux indices pour caractériser un milieu d'habitat. C'est ainsi que M. PRENANT (1932) a construit un dynamomètre d'un genre spécial qui mesure le degré d'enfoncement de tiges d'acier de calibres différents : « La plupart des sables peuvent être définis, ainsi, par des graphiques où la longueur de pénétration de la tige est fonction de la force exercée sur le dynamomètre. »

Une autre caractéristique peut être donnée, pour un ensemble polydispersé, par son indice des vides. Celui-ci exprime le rapport du volume des pleins au volume des vides. Si on avait affaire à un matériau monodispersé rigoureusement constitué par des sphères, cet indice serait constant, quelles que soient leurs dimensions. Mais, dans la réalité, si les sables peuvent être considérés comme constitués par des sphères, tant qu'ils conservent certaines dimensions, à partir d'une limite (qui

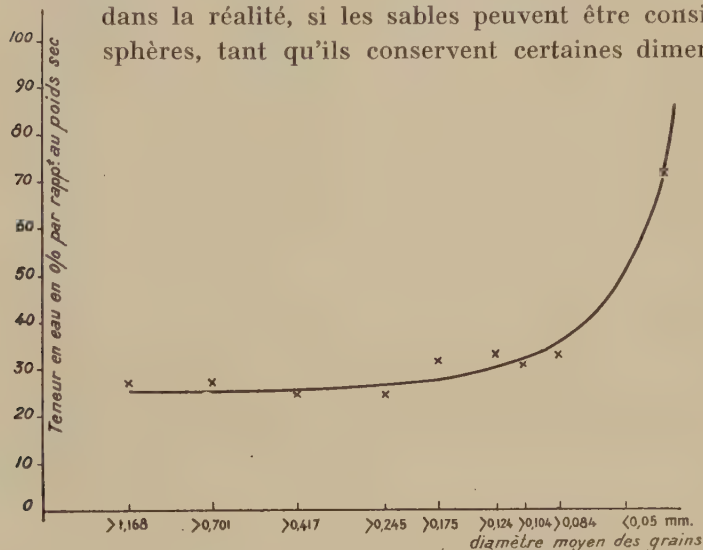


FIG. 78. — Variation de la teneur en eau d'un sable avec la dimension des éléments constitutants d'un sable.

varie d'ailleurs avec le matériau considéré), les grains s'écartent de la forme sphérique, ainsi que L. CAYEUX (1916, 1929) l'a déjà fait remarquer.

De ce fait, et aussi parce qu'un sable naturel est d'autant plus hétérogène que les fractions sont plus fines, l'indice des vides peut augmenter notablement à partir d'une certaine dimension. Du même coup, la teneur en eau augmente aussi à partir d'une certaine limite.

J'ai fait une série de mesures qui corroborent ce qui vient d'être dit. J'ai tamisé des

sables d'origine et de nature variées et recueilli un certain poids de chacune des fractions. Chaque fraction a été placée dans un tube de Borel avec une quantité d'eau suffisante pour le submerger. Les tubes ont été laissés au repos pendant quelques jours (tassement libre), l'eau surnageante a été décantée à l'aide d'une pipette, et la teneur en eau de chaque fraction mesurée et exprimée par rapport au poids sec :

$$Ts = \frac{(P-p) 1.000}{p-t},$$

où P = poids de l'échantillon frais (ou imbibé), plus celui du récipient; p = poids de l'échantillon sec (110°), plus celui du récipient; t = poids du récipient.

La courbe suivante (fig. 78) a été obtenue en portant en abscisse la dimension moyenne des éléments composant chaque fraction et, en ordonnée, le pourcentage d'eau. Il apparaît, sur cette courbe, qu'au delà de 0 mm. 08, la teneur en eau augmente d'une façon notable.

Mais il est bien entendu que cette règle ne peut être généralisée, car, en opérant avec un matériau de même nature (quartz pulvérisé, ou mica, ou tout autre minéral), il est

vraisemblable de penser que les assemblages des grains sont différents et la teneur en eau aussi. La courbe que je donne ici n'est intéressante que parce qu'elle concerne un sable composé de grains variés pouvant se rencontrer dans la nature.

### 3. — Poudres et phases inférieures (éléments < 0 mm. 020).

Cette phase, pas plus que celles des précolloïdes et des colloïdes, ne se trouve à l'état individualisé dans les estuaires; comme on va le voir dans le chapitre suivant, elles entrent en très grande proportion dans la constitution de la vase, dont elles peuvent être parfois les phases constituantes dominantes.

## CHAPITRE III. — LA VASE : SÉDIMENT COMPLEXE (POLYPHASÉ)

### 1. — Définition.

Je n'ai jusqu'ici parlé des sédiments rencontrés dans les estuaires que d'un point de vue assez peu en rapport avec la réalité. En effet, ce ne sont pas tant des sables ou des poudres bien définis granulométriquement que l'on trouve, ce ne sont pas plus des colloïdes humiques ou de fer, mais des complexes, c'est-à-dire des sédiments où entrent, la plupart du temps, les différentes phases granulométriques, différents colloïdes, divers sels, une vie microscopique active ou ralentie et une grande proportion d'eau. Le type de ce sédiment complexe, c'est la vase. Avant d'aller plus loin et d'en tenter une description, il est nécessaire, je crois, de définir, aussi exactement que possible, le terme.

La vase est un terme qui fait image : il évoque aux yeux de tous un matériau semi-liquide, semi-solide, visqueux, plus ou moins plastique, noirâtre et généralement nauséabond. En un mot, il a toutes les qualités suffisantes pour écarter le voyageur, le passant et même, très souvent, le géographe et le géologue. Sans doute, le sens commun a-t-il raison de se figurer la vase sous cet aspect, mais si l'on cherche à revenir aux descriptions données par les différents chercheurs, on ne sait plus très bien de quoi il s'agit. Il est bon, à ce sujet, de se rappeler la confusion constante qui existe chez les traducteurs d'anglais quand ils cherchent à exprimer en français les termes « mud » et « ooze »; ce qui fait que l'on ne sait jamais s'il faut dire une vase bleue et une boue à globigérines, ou une boue bleue et une vase à globigérines. Cette confusion est certes très regrettable quand on songe que le travail de ces deux auteurs (MURRAY et RENARD [1891]) est à la base de toute la géologie océanographique. Si, d'un autre côté, on se réfère à J. THOULET (1904), on s'aperçoit que la vase ne signifie plus, pour lui, qu'une fraction dimensionnelle correspondant, *grosso modo*, à nos poudres. Il faudrait alors comprendre que les muds et les oozes des auteurs anglais sont des poudres. Or, cela n'est pas, ou plus exactement ce ne sont pas que des poudres.

À côté des vases marines des océanographes, il existe un certain nombre de dépôts d'eau douce qu'on qualifie généralement aussi de vase : vases fluviales, d'étang, de lagune, de marais. Les éléments constituants sont de la matière organique putréfiée et des poussières inorganiques; granulométriquement, de ce fait, ils appartiennent aux « vases » de THOULET, mais que sont-ils par rapport aux *muds* de MURRAY et RENARD ? D'après certains travaux russes, et aussi d'après les recherches faites par JACQUES BOURCART et ses

collaborateurs, il semble qu'on puisse aussi les assimiler, en première analyse, aux *muds*.

Il reste encore à parler des termes d'argile et de limon, qui ont parfois été utilisés à la place de celui de vase. En ce qui concerne les argiles, la confusion essentielle provient du fait que ce terme a deux sens suivant les disciplines scientifiques qui l'emploient. Les minéralogistes s'accordent facilement pour définir une argile comme formée par des silicates hydratés, d'alumine ou de fer. Il en existe plusieurs variétés : halloysite, kaolinite, montmorillonite, etc..., qui sont toutes des minéraux phylliteux déterminables aux rayons X, ainsi que par certaines de leurs propriétés physiques (comportement à l'analyse thermique différentielle). Les exposés de PIERRE URBAIN (1937) sont très nets à ce sujet et nous les prendrons comme base de définition et de la reconnaissance des argiles. Par ailleurs, les pédologues, et plus généralement tous les naturalistes, ont tendance à appeler, argile, toute fraction fine rencontrée dans un sédiment. TWENHOFFEL (1932), par exemple, qualifie d'argile les éléments dont le diamètre est inférieur à 10  $\mu$ . Les géologues, géographes et biologistes ont souvent décrit les dépôts noirâtres et fins des estuaires comme étant des argiles (RINNE [1912], A. DE LAPPARENT [1898], etc...).

Il n'est pas possible de retenir la dénomination d'argile dans ce sens, et il faut la rejeter définitivement pour la remplacer par poudre et précolloïde (ou hypocolloïde).

En conclusion, l'argile est formée par un groupe de minéraux bien caractérisés; elle ne peut être, en aucune manière, confondue avec les sédiments hétérogènes fins du type de la vase, même quand elle est l'un de ses constituants (toujours en très faible proportion d'ailleurs).

On a souvent donné une signification sensiblement équivalente à deux types de dépôts qu'il est nécessaire ici de bien distinguer : je veux parler des limons et des vases. Comme les argiles, les limons ont deux sens distincts, suivant les auteurs. Pour les uns, ils constituent, comme les vases de THOULET et les argiles de TWENHOFFEL, une phase dimensionnelle. Ce sont surtout les pédologues qui ont utilisé le mot dans ce sens. Pour les autres, géologues et géographes, le limon est quelque chose de fin, d'assez mal défini et déposé par les crues des cours d'eau (limons du Nil) ou par le vent (loess). *A priori*, limons et vases pourraient être les deux faciès (continental et marin), d'une formation sédimentaire unique. Il s'agirait donc, dans le cas des estuaires, de choisir, puisque l'on se trouve à la limite des deux domaines.

Tandis que j'étudiais les dépôts d'estuaire, BORIS BRAJNIKOV (1941), de son côté, étudiait des limons caractéristiques; et après confrontations des résultats, il semble qu'il faille distinguer entre les limons et les dépôts fluvio-marins que l'on appellera, sans plus d'hésitation : vases. Limons et vases se distinguent les uns des autres par certains caractères : une plus grande proportion de matière organique dans les vases que dans les limons; la vase est un milieu dans son ensemble réducteur (couleur noire), alors que le limon est le plus souvent jaune ou rouge (milieu oxydant). Cela tient, semble-t-il, au fait que les limons sont des dépôts de crues et que, par conséquent, ils ne sont plus normalement recouverts ni imbibés d'eau, alors que les vases sont constamment imprégnées d'eau et le plus souvent recouvertes par elle. Il s'ensuit que le fer, qui entre dans la composition de ces deux sédiments, est, dans un cas, oxydé et, dans l'autre, réduit (d'autant plus facilement qu'aux matières organiques réductrices s'ajoute une intense vie microbienne qui intervient pour transformer le fer en monosulfure [encore une raison de la couleur noirâtre]).

Pour résumer cette discussion et poser des définitions, afin de s'entendre, je classerai, ainsi, les dépôts dont on vient de parler :

*Argile* : Sédiment homogène, dont les éléments constitutants (silicates d'alumine hydratés) ont un diamètre qui permet de les classer dimensionnellement dans les précolloïdes et colloïdes.

*Boue* : Sédiment marin, plus ou moins homogène, constitué par une phase minérale fine (en général de la classe des poudres), inorganique, et souvent une grande concentration de squelettes d'organismes (calcaires ou siliceux) du plancton (exemple : boue à Globigérines, à Diatomées, etc...).

*Limon* : Sédiment constitué par une fraction minérale inorganique qui est en général inférieure à  $90\ \mu$  et, très souvent, dans le domaine des poudres. La fraction minérale est dominée statistiquement par le quartz, mais dans laquelle le carbonate de calcium peut être aussi abondant. A cette fraction minérale s'ajoute une certaine proportion de fer (2 à 3 %) (à l'état, en général, d'hydroxydes) et parfois de petites quantités de matières organiques. Le rapport  $M = C/Fe$  (B. BRAJNIKOV [1941]) (du carbone au fer total) varie de 0,01 (limons anciens) à 0,5 (limons actuels). C'est un dépôt superficiel des eaux courantes rarement recouvert par elles et qui doit sa couleur ocre-jaune-rouge à l'état d'oxydation du fer.

*Vase* : Sédiment essentiellement polydispersé et polyfractionné, constitué généralement pas une phase sableuse fine, une phase pulvérulente, des colloïdes (fer et matière organique). Déposée sous l'eau, constamment imbibée par elle. Couleur noirâtre due à la matière organique et au sulfure de fer. Milieu réducteur. Rapport C/Fe voisin de 1 pour les vases typiques d'estuaire (Penzé).

Si la proportion de sable augmente par rapport aux autres phases, on passe insensiblement des vases aux vases sableuses, puis aux sables vaseux.

Il existe également des intermédiaires entre les vases typiques et les limons (estuaires marocains). Les vases marines (muds) : bleues, rouges, vertes (glauconie), les vases lacustres et les vases d'estuaire sont rapprochables les uns des autres. Seul le milieu aqueux change et entraîne donc une différence dans la vie microscopique et le comportement physico-chimique.

Ainsi définis, peut-être assez arbitrairement (mais il fallait bien se décider à trancher), ces termes ne peuvent plus être confondus et être mis les uns à la place des autres. J'insisterai encore en disant que ces termes ne désignent plus ainsi des domaines dimensionnels, mais des ensembles naturels plus ou moins complexes et plus ou moins polydispersés.

Il me faut maintenant aborder l'étude des vases fluvio-marines.

## 2. — Aspect macroscopique.

Ainsi donc la vase est essentiellement un dépôt qui se fait sous l'eau. Très généralement, elle n'apparaît par conséquent pas à nos yeux : vases marines, lacustres. Mais les estuaires possèdent le privilège de la marée et leurs rives découvrent plusieurs heures par jour, permettant ainsi un examen prolongé et attentif des dépôts qui s'y forment. Dans une autre partie de ce travail, les aspects et formes géomorphologiques, qu'ont les dépôts d'estuaire, seront décrits, à l'échelle d'observation du géographe. Ici, je voudrais

préciser ce qu'est la vase et quels sont les caractères macroscopiques qui permettent de la distinguer de toute autre formation. Disons tout de suite que ces caractères ne sont pas toujours très nets et que, pour éviter une confusion possible, l'examen microscopique et l'analyse chimique sont nécessaires.

Dans un estuaire quelconque de Bretagne, la vase de la slikke apparaît comme un sédiment d'aspect homogène, noirâtre, jaunissant parfois sur des aires assez considérables. La surface est lisse et il n'est pas rare de pouvoir y observer une mince pellicule d'eau, ce qui lui donne des reflets brillants et un éclat qui rappellerait un peu celui de pechstein. Si l'on s'approche, on aperçoit presque toujours de nombreux trous de quelques millimètres à quelques centimètres de diamètre : ce sont les orifices des galeries de mollusques (*Mya arenaria*, *Scrobicularia piperata*) qui vivent enfouis dans la vase. Si l'on essaie de marcher sur la vase, on s'enfonce assez profondément et il est difficile de se dégager. C'est donc un sédiment mou et presque fluide dans certains cas, preuve d'une teneur en eau élevée. Il semble d'ailleurs souvent saturé d'eau, car si on le comprime tant soit peu, elle gicle : il y a là l'indication d'une certaine imperméabilité. Malgré la liquidité relative et apparente de la vase, elle ne se comporte pas comme un liquide visqueux, car les traces de pas, ou toute autre marque faite à sa surface, ne disparaissent pas : elle est donc rigide et c'est là une de ses propriétés physiques caractéristiques soulignées par J. BOURCART et V. ROMANOVSKY (1941). Quand sa teneur en eau est suffisamment élevée, elle est également thixotrope, c'est-à-dire qu'au repos elle est rigide et que, par agitation, elle se liquéfie. C'est une propriété physique importante et qui est à la base de l'explication rationnelle des enlissements partiels ou complets que l'on peut observer.

Si l'on ramasse de la vase d'estuaire (de la Penzé, par exemple) à la main, très généralement l'homogénéité première disparaît et l'on s'aperçoit qu'il existe une certaine quantité de sable. Cette fraction sableuse est plus ou moins fine, plus ou moins importante. Sa proportion relative permet d'ailleurs de délimiter les termes de sable vaseux et de vase sableuse. La vase idéale, ne contenant pas de phase sableuse, existe cependant quelquefois (bri charentais, poto-poto de Guinée, jalle de la Loire, etc...). Mais, le plus souvent, dans les estuaires bretons, on a affaire à des vases sableuses. Il est évident, et il faut le noter tout de suite, que les propriétés de rigidité, de thixotropie, d'imperméabilité, changent lorsqu'on passe des vases, aux vases sableuses ou aux sables vaseux (elles disparaissent habituellement avec ces derniers). J'y reviendrai plus loin.

Comme on l'a dit déjà, la vase dégage une odeur assez désagréable, bien que l'on exagère la plupart du temps cette odeur nauséabonde. Dans une partie de l'estuaire, éloignée des égouts ou des points de déversement des eaux polluées d'usine et d'agglomération, la vase ne sent à peu près rien. Je dirai même qu'il s'en dégage une agréable odeur de marée. L'odeur d'œufs pourris provenant du dégagement d'hydrogène sulfuré n'est nette que dans les ports et dans les bœaux où la vase a séjourné longtemps sans être aérée.

On a décrit parfois des feux follets, provenant des vasières, dus, paraît-il, aux dégagements de méthane. Je ne mettrai pas en doute les observateurs, mais il ne m'a jamais été donné de constater de telles apparitions. Là encore je crois bien que le phénomène ne doit pas se produire dans les estuaires, mais dans des lieux (marais) où la décomposition de la matière organique en milieu anaérobie conduit à une fermentation analogue à celle du fumier (*Bacille amylobacter*).

Quand la vase demeure un temps suffisamment long à l'air libre, son aspect se transforme. Il en est ainsi pour la partie haute de la slikke quand elle n'est pas recouverte avec chaque marée. La vase commence par se dessécher et sa teneur en eau diminue dans de larges proportions. Dès lors, l'homogénéité apparente disparaît et on peut beaucoup plus facilement distinguer les vraies vases des vases sableuses. Si le dessèchement se poursuit, des fentes de dessiccation apparaissent. Comme dans le cas de tous les matériaux meubles assez fins (argiles, limons), ces fentes se disposent en réseaux plus ou moins réguliers (V. ROMANOVSKY et A. CAILLEUX [1942]). La vase prend peu à peu l'aspect d'une véritable roche consolidée, et cela est d'autant plus net que la phase sableuse est moins abondante.

Si, expérimentalement, on fait dessécher à l'étuve à 110° une vase où la phase sableuse est inexistante, elle se transforme en un bloc solide, compact et qu'on ne peut casser qu'au marteau ou au pilon. La cassure n'est pas alors celle d'un grès, mais ressemble beaucoup à celle d'un calcaire lithographique : c'est une cassure conchoïdale lithique. Un phénomène analogue s'observe également, sans que la dessiccation soit aussi poussée, avec des vases exondées comme le bri. Le terme de matériau meuble ne convient pour ainsi dire plus : on a affaire à une véritable roche, dont cependant les éléments constitutants n'ont pas été cimentés par un ciment exogène, — cette cohésion si frappante n'est due qu'à l'adhésion très forte des particules, entre elles liées par des colloïdes (déshydratés). Ce sont ces derniers qui sont essentiellement responsables de cette transformation.

Il est d'ailleurs remarquable de constater que la vase, une fois desséchée à l'étuve à 110°, perd la plupart de ses propriétés. Ainsi, si on la place de nouveau dans l'eau et qu'on l'agite, elle ne reprend pas son premier aspect, mais celui d'une poudre. Comme tout à l'heure, ce sont les modifications subies par les colloïdes qui sont la cause de ce nouvel état.

Corrélativement, la vase perd sa couleur noire et, par suite d'oxydations plus ou moins intenses, elle devient gris clair (vases des estuaires bretons à teneur en matière organique élevée) ou jaune ocre (vases des estuaires marocains à teneur en fer élevée).

La vase du schorre subit aussi une transformation du même ordre, mais moins visible par suite de la végétation qui y pousse. Presque toujours, en tout cas, la vase perd sa couleur noire et elle s'éclaircit vers le gris ou le jaune, suivant la teneur en fer et le climat. Mais elle ne subit qu'une dessiccation partielle et si, pour une raison quelconque, elle se trouve de nouveau imbibée et gonflée d'eau, et n'ayant pas subi une destruction de ses constituants, elle reprend l'aspect typique de la vase de la slikke. C'est là un fait d'observation courante le long des marigots qui découpent le schorre.

Les vases plus anciennes, comme la « jalle » de la Loire maritime ou le « bri » des marais du Centre-Ouest de la France, ou les dépôts de la plaine maritime littorale de la Mer du Nord, sont en général très fines, grisâtres (la jalle est nettement noire), très compactes et prennent l'allure des véritables roches argileuses.

Pourtant, si la phase sableuse paraît souvent absente ou réduite à une très faible proportion, les constituants habituels des vases actuelles s'y retrouvent (C. ROEHRICH [1941] pour le bri charentais). Il est, par contre, très regrettable que tous ces dépôts quaternaires des plaines littorales n'aient jamais été étudiés soit au microscope, soit

chimiquement, avant C. ROEHRICH, car les auteurs qui les ont décrits ont parlé d'argiles, d'argiles de polders, etc... (J. WELSCH [1919], G. DUBOIS [1924]), et il semble que leur qualification ait été uniquement macroscopique.

### 3. — La vase, système hétérogène.

#### A. — HOMOGÉNÉITÉ D'ENSEMBLE, HÉTÉROGÉNÉITÉ RÉELLE

Les vases de la slikke — ce sont celles sur lesquelles il faut baser les descriptions et les recherches, puisqu'il s'agit de dépôts s'accumulant sous nos yeux — apparaissent au premier abord comme un sédiment homogène à l'échelle de l'œil. Un examen plus attentif, à la loupe, et surtout au microscope, résoud cette homogénéité apparente en une hétérogénéité très grande. En élargissant le terme physique de système hétérogène, on peut l'appliquer aux vases. Un système hétérogène est par définition constitué de plusieurs phases (polyphasé).

La vase est constituée de deux milieux (ou phases) : un milieu liquide et un milieu solide. De ce fait, on pourrait penser qu'elle constitue ce qu'on appelle une suspension, ou mieux ce que J. DUCLAUX (1934) nomme un mélange grossier. Celui-ci est, en effet, composé par un milieu liquide continu, dans lequel se trouve réparti le milieu solide discontinu, mais dont les éléments constitutifs ont des dimensions qui vont de 0 mm. 01 aux dimensions visibles à l'œil nu. Dans la réalité, comme on le verra, le milieu solide de la vase est composé d'éléments qui ont bien ces dimensions, mais aussi de plus fines particules, de telle sorte qu'on peut dire qu'elle est aussi une suspension (diamètre des particules allant de 0,01 à 0,0001 = poudres et précolloïdes [ou suspensoïdes] de J. BOURCART [1941]), et aussi une solution colloïdale. Tout cela est vrai dans une certaine mesure, tant que la vase n'est pas déposée, tant qu'elle est en suspension dans l'eau. Mais, une fois déposée, elle acquiert des propriétés qui ne permettent plus de la considérer ni comme une suspension, ni comme un sol. Elle peut rappeler, comme le pense J. BOURCART, dans une certaine mesure, un gel. Mais un gel très hétérogène et très grossier. Quoi qu'il en soit, même déposée, elle est constituée par un milieu liquide et par un milieu solide. Il nous faut les étudier successivement.

#### B. — LE MILIEU LIQUIDE

*La teneur en eau des vases.* — Je ne donnerai ici qu'à quelques résultats concernant la teneur en eau des vases, réservant pour un paragraphe ultérieur l'étude même de l'eau. Il est évident qu'il est assez délicat de mesurer la teneur naturelle en eau d'une vase, car il est certain — surtout lorsqu'il s'agit des vases de surface dont le dépôt est très récent et qui viennent d'être abandonnées par l'eau de l'estuaire — que la prise même de l'échantillon détermine une élimination partielle de l'eau par suite des compressions. Avec de très grandes précautions, et en ayant soin d'utiliser des bocaux hermétiques, on arrive tout de même à obtenir un ordre de grandeur satisfaisant. Les vases qui viennent de découvrir sont les seules pour lesquelles on peut parler de teneur naturelle en eau, car dès qu'elles sont abandonnées à l'air libre, il s'évapore fatalement une certaine quantité d'eau.

Pour les vases plus profondes, l'évaporation est moins intense et la teneur naturelle en eau est plus facile à obtenir.

A l'appui de ce que j'avance, je donnerai les résultats obtenus sur une vase de la slikke du Bou-Regreg (Pont-Route), où les échantillons ont été recueillis quelques minutes seulement après qu'ils étaient découverts :

|                                     | Teneur en eau<br>% par rapport du poids sec |
|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| Extrême surface de la slikke .....  | 54                                          |
| Slikke (15 cm. de profondeur) ..... | 64                                          |

Le soleil brillait, il était 13 heures. L'évaporation était donc maximum et elle explique cette différence de 10 % qui pourrait — si l'on n'était prévenu — paraître peu conforme à la réalité.

Les vases ont des teneurs en eau très variées. Il est parfois possible de saisir la cause de cette variété, mais quelquefois aussi elle est très obscure.

En premier lieu, la vase constituée d'éléments fins (phases poudres, précolloïdes et colloïdes), voit sa teneur en eau augmenter considérablement par rapport aux sables (à rapprocher de la figure 78). En ce qui concerne les colloïdes eux-mêmes, on sait qu'ils ont la propriété de se gonfler d'eau (gelée), ce qui vient d'autant ajouter à la teneur en eau, particulièrement élevée, des vases.

J. BOURCART et V. ROMANOVSKY (1941) semblent avoir montré que la vase possède, une fois déposée, une certaine structure (d'où ses propriétés de rigidité et de thixotropie) : une certaine quantité d'eau peut être retenue entre les mailles.

Par contre, différents facteurs peuvent intervenir pour que la vase voit sa teneur en eau naturelle diminuer : il faut, pour mémoire, rappeler la dessiccation et, ce qui est plus remarquable, la compression. Ainsi, un échantillon de la surface de la slikke aura une teneur en eau qui sera bien plus élevée qu'une vase ancienne draguée dans le chenal. Ceci est d'autant plus vrai que la vase n'est pas (ou seulement dans une faible mesure) élastique, aussi laissera-t-elle sourdre de l'eau à mesure que la pression augmentera; mais elle ne s'imbibera pas d'eau si la pression cesse de se faire sentir, à moins naturellement qu'on la remette de nouveau en suspension par un moyen mécanique (agitateur), et encore, la structure ayant été détruite, la teneur en eau ne sera pas nécessairement la même.

Le tableau ci-après donne les valeurs de la teneur en eau par rapport au poids sec de l'échantillon :

|                                                                                                                 | %<br>teneur<br>en eau | %<br>de la fraction<br>< 0 mm. 047 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Slikke rive gauche, au Viaduc (Penzé).....                                                                      | 87                    | 53                                 |
| » rive droite, Pont de la Corde (Penzé).....                                                                    | 131                   | 82                                 |
| » (surface) au niveau de l'eau à B. M. 1.....                                                                   | 143                   | —                                  |
| » Pont de la Corde, au niveau de l'eau à B. M. 2.....                                                           | 102                   | —                                  |
| » Pont de la Corde, au niveau de l'eau à B. M. 3.....                                                           | 99                    | —                                  |
| » Penzé, haut de la slikke 4.....                                                                               | 126                   | —                                  |
| » (surface), à Penzornou (R. G.) (Penzé).....                                                                   | 139                   | —                                  |
| » (20 cm. de prof.), à Penzornou (Penzé).....                                                                   | 50                    | —                                  |
| » aval de Donges (Loire maritime).....                                                                          | 62                    | 94                                 |
| Echantillon de dragage du chenal aval de Donges (Loire).....                                                    | 36                    | 77                                 |
| Echantillon de dragage du chenal aval de Donges (Loire).....                                                    | 61                    | 91                                 |
| Vraie suspension stable dans de très légères dépressions à la surface de la slikke, aval de Donges (Loire)..... | 590                   | 95                                 |

Tels sont les résultats, parfois assez surprenants ou même contradictoires, que j'ai obtenus. Mais ils peuvent, cependant, se classer assez bien suivant les deux règles princi-

pales indiquées plus haut : à savoir que la teneur en eau augmente avec la finesse des particules (exemples de la Penzé), et qu'elle diminue quand la pression s'accroît (exemples des vases anciennes draguées dans le chenal de la Loire).

Une mention particulière à l'échantillon tout à fait remarquable que j'ai recueilli à la surface de la slikke, en aval de Donges. Des dépressions de l'ordre de quelques centimètres de hauteur s'étaient formées à la surface de la slikke et elles étaient remplies d'une suspension jaunâtre très concentrée, mais très stable, — qui faisait que l'on pouvait hésiter à voir, là, une vase très fluide ou une suspension très concentrée. Sans doute, certaines conditions physicochimiques particulièrement favorables étaient-elles réalisées pour conserver à ce moment sa stabilité à la suspension, car, quelques jours après, au laboratoire, on distinguait très nettement une partie contenant les particules au fond du bocal, surmontée par une partie de liquide limpide. Les conditions physicochimiques avaient dû changer dans l'intervalle (je n'ai pu faire de mesure immédiate de pH). La teneur en eau de 590 %, tout à fait extraordinaire, exprime bien que l'on avait affaire à une vraie suspension.

Comme il est souvent difficile d'effectuer une mesure de teneur naturelle en eau, j'ai cherché à lui substituer une mesure qui serait toujours applicable au laboratoire. C'est ce que j'ai appelé *teneur en eau sous tassement libre (Ts. l.)*. Mais le chiffre que donne cette méthode est généralement plus élevé que celui de la teneur naturelle en eau. Ainsi, par exemple, au Pont de la Corde (Penzé - rive droite), les vases de la slikke :

|        | T. % | Ts. l. % |
|--------|------|----------|
| 1..... | 143  | 185      |
| 2..... | 102  | 141      |
| 3..... | 99   | 122      |
| 4..... | 126  | 172      |

Toutefois, en étant prévenu, cette expression peut donner d'utiles indications. Elle a d'ailleurs une signification identique à celle de l'indice des vides et, par là, son utilisation est suffisamment justifiée.

En tout cas, ce que l'on peut retenir de certain, c'est que les vases des slikkes actuelles ont une teneur en eau de l'ordre de 100 à 200 % du poids sec. C'est un caractère essentiel sur lequel on reviendra, car son importance est grande.

### C. — LE MILIEU SOLIDE

1. GRANULOMÉTRIE. — Voilà déjà longtemps qu'océanographes et pédologues utilisent, dans le but de séparer les différentes fractions dimensionnelles d'un ensemble, la technique du tamisage. C'est celle que j'ai utilisée pour les sables. Dans le cas des vases, il m'a semblé moins nécessaire de pousser l'analyse granulométrique dans le détail et je me suis contenté de trois tamis : les tamis n° 10, 160 et 300. Ainsi, je sépare les éléments constituant d'un échantillon en quatre fractions :

|                                                      |             |
|------------------------------------------------------|-------------|
| 1. Fraction cailloux : éléments de diamètre.....     | > 2 mm.     |
| arrêtée par le tamis 10.                             |             |
| 2. Fraction sableuse (grossière) éléments.....       | < 2 mm.     |
| arrêtée par le tamis de 160.                         | > 0 mm. 090 |
| 3. Fraction sableuse (fine = sablons) : éléments.... | < 0 mm. 090 |
| arrêtée par le tamis 300.                            | > 0 mm. 047 |
| 4. Fraction poudre + colloïdes : éléments.....       | < 0 mm. 047 |
| qui passe le tamis 300.                              |             |

Pour obtenir une bonne séparation, il est préférable de tamiser sous l'eau.

Plusieurs auteurs, et parmi eux B. RAJČEVIĆ (1939), estiment intéressant de pousser plus avant ces séparations et d'utiliser à cette fin une des méthodes de lévigation, de sédimentation, de densimétrie, toutes basées sur la loi de Stokes. On se rappelle cette loi, qui donne le diamètre des particules en fonction de leur vitesse de chute dans un milieu de viscosité et de température connues. Cette loi ne se vérifie que lorsqu'il s'agit de particules rigoureusement sphériques. Les méthodes dont il est question nécessitent donc de supposer que les particules du sédiment sont sphériques. Si, empiriquement, pour un matériel donné, on peut se servir d'une formule du type de celle de Stokes, cela devient très difficile dans le cas des vases où les formes des particules sont excessivement variées pour un même échantillon et très variables d'un échantillon à l'autre.

L. BESSE (1938) a montré que, dans le cas des particules de mica, la loi de Stokes perdait toute signification. C'est d'ailleurs également l'avis de J. DUCLAUX (1934). Je n'ai donc pas jugé utile, dans ces conditions, d'utiliser une de ces méthodes de séparation, qui ne m'auraient donné que des résultats dont la rigueur eût été illusoire.

Pour figurer les résultats donnés par le tamisage, je me suis servi des rectangles proportionnels au pourcentage par rapport au poids sec. Les graphiques ainsi obtenus représentent les fractions constituantes de sédiments vaseux macroscopiquement ou de vases sableuses. Certes, leur aspect naturel permet de les classer, sans doute possible, dans la catégorie des vases ou des vases sableuses, mais on voit qu'il existe une très grande variété dans la répartition des fractions dimensionnelles. En somme, il existe tous les termes de passage entre les vases et vases sableuses et il est difficile, sans faire intervenir les différences dans les propriétés physiques, de délimiter exactement ce qu'on peut appeler vase et ce qu'on peut appeler vase sableuse.

D'ailleurs, en raisonnant, comme je l'ai proposé tout à l'heure, on n'a pas le droit, jusqu'à présent, de parler de vase, puisqu'on ne possède que des données dimensionnelles. Par contre, on peut dire que les sédiments étudiés se composent de quatre fractions, en proportion variable suivant les échantillons : cailloux, sable grossier, sable fin, poudre (et particules plus fines, colloïdes).

On peut tenter de classer ces différents échantillons. Cette classification granulométrique des sédiments vaseux (fig. 80) est très arbitraire; mais, en attendant que V. ROMANOSKY (1943) établisse des coupures sur des discontinuités dans les propriétés physiques, elle est commode.

I. — Une première série comprendra ceux dont le pourcentage en poudres et colloïdes est supérieur à 90 % : ce sont surtout les échantillons de la Loire (52, 54, 57, 62, 48), et certains de la Gironde et du Bou-Regreg. Ces sédiments ont une homogénéité d'aspect tout à fait frappante. C'est dans de pareils cas que l'on comprend que les observateurs aient été tentés d'utiliser le mot « argile ». Mais pourtant, notons-le avec soin, il existe toujours une phase sableuse (ou grossière, ou fine : c'est même le cas pour l'échantillon 52 de la Loire, qui n'est autre que la suspension vraie recueillie sur la slikke et dont la teneur en eau était de 590 % (voir p. 262).

II. — La deuxième série sera celle dont le pourcentage en poudres est inférieur à 90 %, mais supérieur à 50 %. Dans cette rubrique apparaissent presque tous les échan-

tillons des estuaires bretons et du Maroc. C'est de loin le type le plus fréquent : celui que tout le monde appelle vase. En réalité, comme on le voit, il y entre une notable quantité de sable, d'ailleurs parfois reconnaissable au toucher.

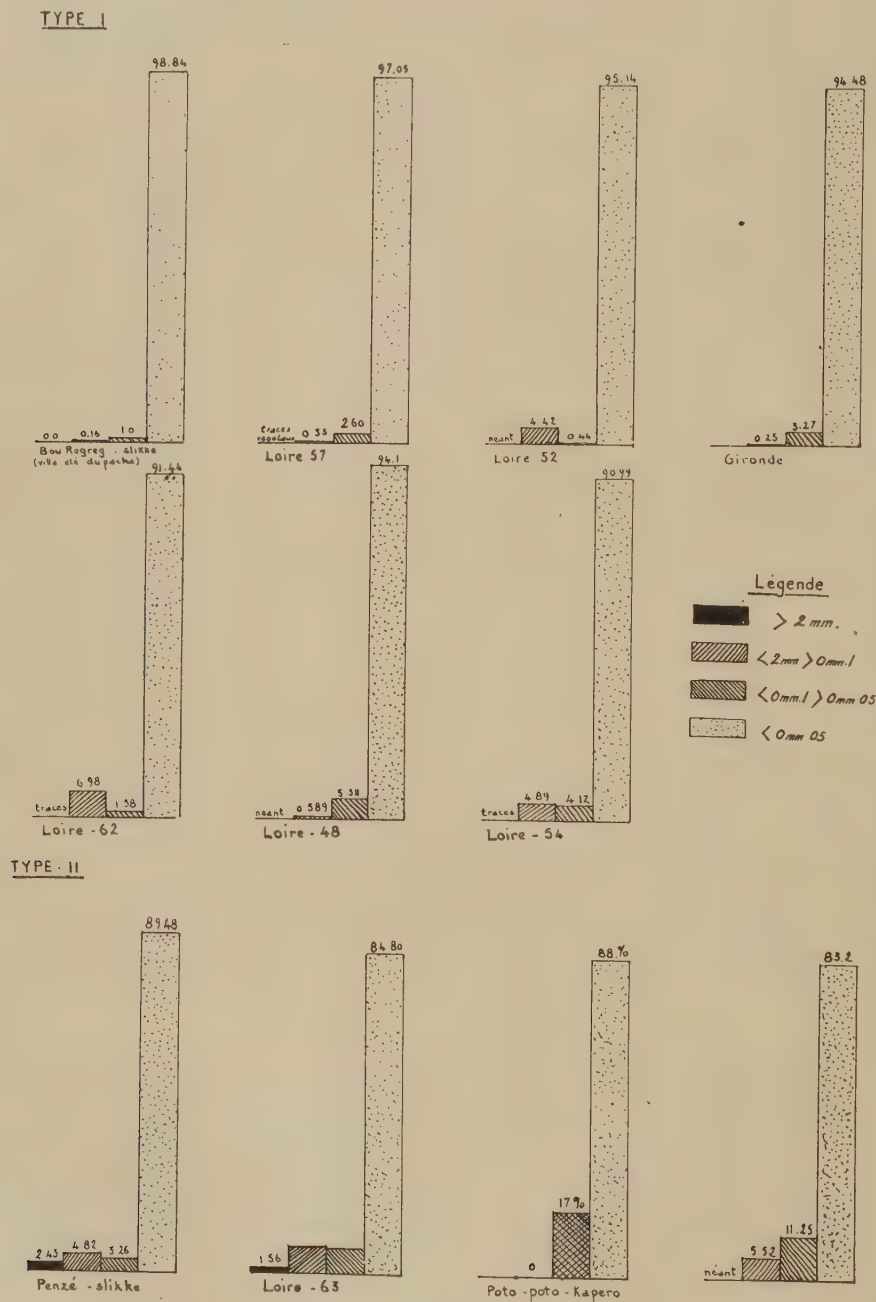


FIG. 79.

III. — La troisième série sera finalement celle dont le pourcentage en poudre est inférieur à 50 %. Dès ce moment, l'hétérogénéité est apparente à l'œil. Ce type de sédi-

ment est fréquent dans les estuaires, mais moins cependant que ceux de la deuxième série.

Insensiblement, de la troisième série, on passerait aux sables vaseux et aux sables

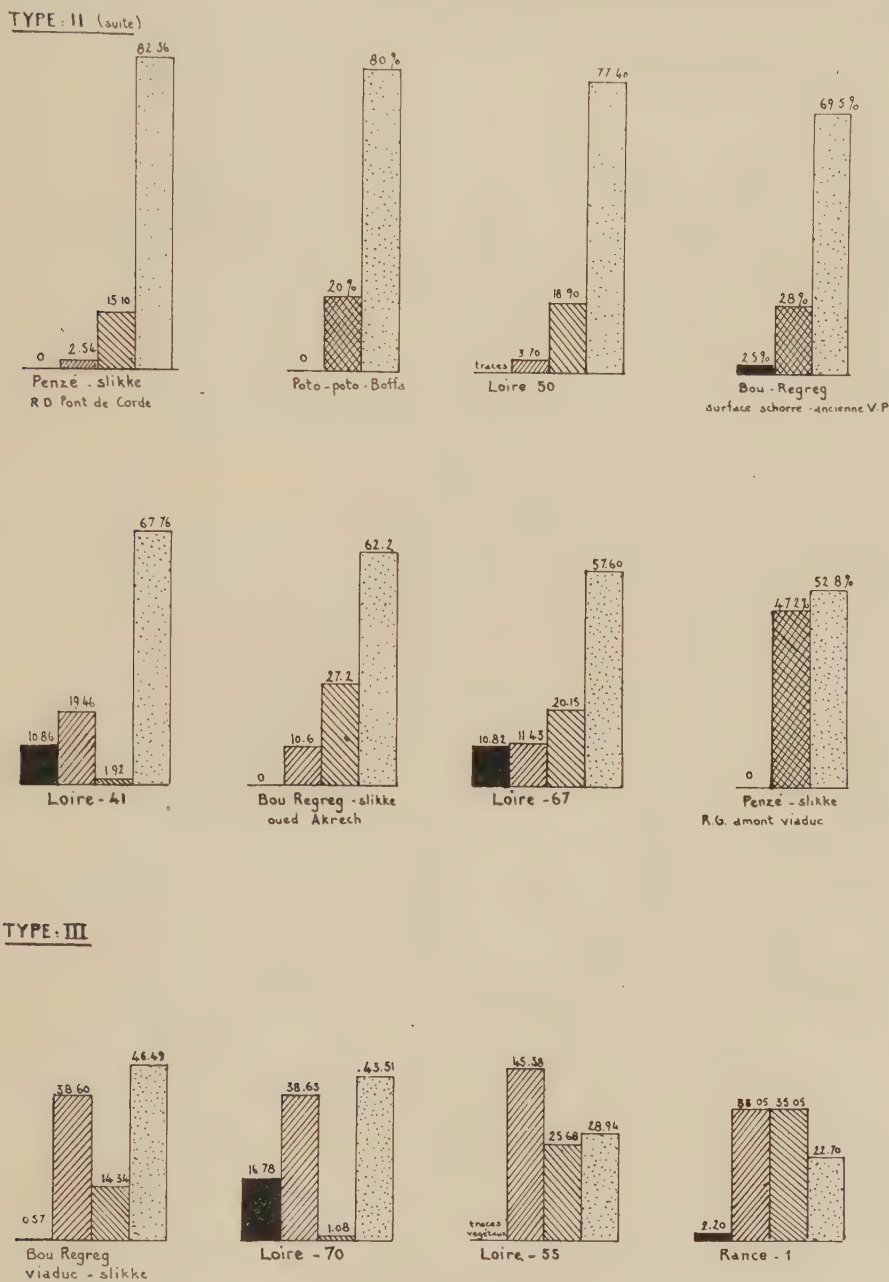


FIG. 80.

proprement dits. Pour situer les sables vaseux, le meilleur exemple à donner est celui des sables de très nombreuses plages bretonnes (basse plage) : en surface, on voit un sable blanc ou jaune et, quelques centimètres en-dessous, ce même sable apparaît noir

et très généralement fréquenté par des Vers (Annélides) : Aber de Roscoff. Macroscopiquement, un tel sédiment est un sable noir, sali, mais qui, dans l'ensemble, garde ses propriétés de sable. Si on lui accole souvent le qualificatif de vaseux, c'est uniquement à sa couleur qu'il le doit. Mais, naturellement, le pourcentage de matière noire (colloïdes humiques et sulfure de fer) peut augmenter et on passe ainsi progressivement aux sédiments du type de la troisième série.

2. COMPOSITION MINÉRALOGIQUE. — La nature des constituants des différentes fractions est à noter. Les cailloux, lorsqu'il y en a, sont généralement des débris de roches provenant des versants, et n'ont certainement pas été charriés par le fleuve. Les sables, grossiers ou fins, sont dominés statistiquement par le quartz, auquel il faut ajouter, notamment pour les vases bretonnes (Penzé, Loire, etc...), une grande quantité de mica (biotite surtout, mais parfois muscovite), quelques minéraux lourds, comme la tourmaline, les grenats. Quant aux poudres, elles sont constituées par du quartz, généralement en fins éclats, brillants, aigus. A ce quartz s'ajoutent tous les microorganismes ou squelettes de microorganismes : Diatomées, Foraminifères, spicules d'Eponges, radioles d'Echinodermes, etc..., et enfin, dans certaines vases (Seine), une grande proportion de poudre calcaire (provenant de la craie).

Restent enfin les colloïdes qui n'apparaissent pas individualisés sur les graphiques. Ils sont en quantité variable dans les vases, mais toujours présents. Un moyen simple pour les mettre en évidence consiste à mettre de la vase en suspension par agitation dans de l'eau. Rapidement, les sables tombent au fond du récipient, puis ce sont les poudres, et enfin (quand le pH n'entraîne pas une floculation rapide des colloïdes), ces derniers demeurent en suspension dans le liquide (même après centrifugation). Ce procédé n'est que qualitatif, mais les méthodes de sédimentation à la pipette ou de lévigation donnent (avec la réserve que j'ai signalée sur l'exactitude de la méthode) un ordre de grandeur de la quantité de colloïdes. Ainsi BOGDAN RAJČEVIĆ (1939), dans les vases sableuses du Bras de Freneuse (Seine), signale jusqu'à près de 10 % de colloïdes. Cet ordre de grandeur est acceptable pour la plupart des vases d'estuaire, car, par l'analyse chimique, on arrive à déterminer un pourcentage sensiblement analogue.

Il est vraisemblable de penser que, parmi ces colloïdes, les argiles, ou mieux, les minéraux de l'argile, tiennent une certaine place. Au microscope, on ne peut pas reconnaître commodément les minéraux de l'argile dans les vases, mais ils sont possibles à déceler, à l'aide des spectres de rayons X, à condition bien entendu d'enrichir la prise d'essai en minéraux de l'argile, grâce à un processus décrit par P. URBAIN (1937).

Il arrive, comme on vient de le dire, que certaines vases contiennent une plus ou moins grande proportion de calcaire. C'est le cas des vases de la Seine étudiées par B. RAJČEVIĆ. C'est le cas aussi des vases de l'estuaire du Bou-Regreg. C'est un élément beaucoup plus rare dans les vases des estuaires bretons. En effet, le calcaire peut avoir une double origine : ou il provient de la désagrégation de roches du bassin versant, et dans ce cas il peut être abondant (notamment dans la fraction poudre, comme c'est le cas pour les vases de la Seine), ou il provient du concassage des coquilles de mollusques ou des squelettes des organismes microscopiques ou non (Foraminifères, Bryozoaires, Crustacés, Oursins, radioles et tests, etc...), et, dans ce cas, il est beaucoup moins abondant. Je ne l'ai pas dosé systématiquement dans tous les échantillons que j'ai recueillis.

La plupart du temps, cet élément étant assez rare, je me suis contenté de l'éliminer par une attaque à l'acide chlorhydrique dilué pour éviter la perte du poids de  $\text{CO}_2$  dans la calcination ultérieure de la matière organique. Dans l'estuaire du Bou-Regreg, j'ai obtenu les résultats suivants :

|                              |       |                       |
|------------------------------|-------|-----------------------|
| Chenal de l'oued Akrech..... | 1,25  | % de $\text{CO}_3$ Ca |
| » Ferme Gibert.....          | 4     | » »                   |
| Slikke Ferme Gibert.....     | 6,30  | » »                   |
| » villa du Pacha.....        | 7,25  | » »                   |
| » viaduc du chemin de fer..  | 13,50 | » »                   |
| » Tour Hassan R. D.....      | 9,60  | » »                   |

Il semble donc que le pourcentage en carbonate de calcium augmente lorsqu'on se rapproche de l'embouchure, c'est-à-dire quand la proportion de coquilles marines brisées augmente.

Mais la teneur en calcaire d'un échantillon de vase reste toujours assez arbitraire : il suffit de tomber sur une coquille dans la prise d'essai pour que les résultats soient complètement faussés. La seule manière correcte de procéder consisterait à faire des moyennes.

3. ACTIVITÉ ET INERTIE DE LA VASE. — BORIS BRAJNIKOV (1941, 1942), s'étant inspiré des idées du grand géochimiste russe W. VERNADSKY (1924, 1929), sur le rôle de la matière vivante dans la genèse de la croûte terrestre, est arrivé à distinguer, dans les roches superficielles (sédiments, sols, etc...), deux groupes de constituants : les constituants inertes et les constituants actifs :

« Les principaux facteurs définissant l'activité relative de chaque constituant sont :

1° Facteurs spécifiques : constitution chimique, état cristallin ou colloïdal, dimension et forme des particules, charge électrostatique.

2° Facteurs du milieu : composition chimique, réaction (pH), température, organismes (à quoi j'ajouterai potentiel d'oxydo-réduction, rH).

Feront donc partie, en général, des constituants actifs, les corps ionogènes (par dissociation, hydrolyse, ou désorption), les colloïdes, les phyllites, la matière organique. Parmi les constituants inertes, le quartz domine, statistiquement, d'une manière absolue, sur tous les autres. »

Cette distinction, fondamentale, en constituants inertes et actifs, peut, à mon avis, servir de base à l'étude de la vase et, qui plus est, de tous les sédiments.

Le milieu inerte dans la vase, on vient d'en parler : c'est, somme toute, celui qui constitue l'essentiel des phases sable et poudre, où, dans chacune, le quartz domine statistiquement. Cette partie inerte est constituée par des grains ou particules isolées réalisant un milieu discontinu. Ces grains et particules sont liés les uns aux autres par un liant (selon l'expression de J. BOURCART) d'origine colloïdale qui, sans être continu comme un milieu aqueux, est cependant plus continu que le milieu inerte. C'est lui qui donne à la vase ses propriétés d'ensemble parmi lesquelles on doit placer au premier plan sa plasticité.

4. NATURE CHIMIQUE DU LIANT (MILIEU ACTIF). — J'ai cherché à connaître la nature de ce liant : il s'agit de matière organique en décomposition tendant vers le complexe qu'est l'humus et de fer, dont les états d'oxydation sont très variables. Ainsi le liant, matière

organique et fer, réalise la majeure partie du milieu actif selon l'expression de BRAJNIKOV. Une expérience simple, qui met en évidence ces deux constituants, consiste à calciner une vase. Tout d'abord, elle perd sa couleur brunâtre et devient jaune ou rouge, tous les grains sont recouverts de cette patine de fer. Si on attaque ensuite à l'acide sulfurique à l'ébullition, tout le fer passe à l'état de sulfate ferrique et le résidu solide apparaît alors très nettement : c'est un sable et une poudre quartzeuse, et tous les éléments sont désormais libres les uns par rapport aux autres.

1° *La matière organique.* — Il y a longtemps que l'on sait que les vases littorales marines, que les vases lacustres ou fluviales contiennent une proportion plus ou moins grande de matière organique.

Les auteurs allemands, les auteurs russes (voir *in* K. ANDRÉE [1920]) notamment, avaient très bien vu le rôle important — sinon essentiel — que joue la matière organique dans la constitution des vases marines ou fluvio-marines de la Mer du Nord et de la Mer Noire. Mais il semble que tous ces travaux, bien antérieurs à 1914, aient été peu connus des géologues, ou seulement oubliés. Du point de vue océanographique, le rôle de la matière organique dans les vases bleues a été signalé par J. MURRAY et RENARD (1891), puis par L. W. COLLET (1908). Les sédiments des étangs méditerranéens étudiés par SUDRY (1910) et CHEVALIER (1915), tous deux élèves de J. THOULET, sont aussi, en partie, constitués de matière organique.

B. BOYSEN-JENSEN (1914) étudiait déjà les vases littorales de la Mer du Nord et constatait que le rapport C/N variait peu (de 8 à 12), tandis que la teneur en carbone variait dans des limites beaucoup plus larges.

En 1916, APSTEIN effectuait des recherches dans le même sens.

MOORE, en 1930 et 1931, dosait l'azote des vases du bassin de la Clyde.

Beaucoup plus récemment, les océanographes américains du laboratoire de Wood's Hole ont examiné et étudié de plus près les vases littorales, notamment du Golfe du Maine. Le célèbre pédologue S. A. WAKSMAN (1933-1937), sachant combien le rapport du carbone à l'azote est important à connaître dans le cas des sols terrestres, a publié plusieurs études contenant des déterminations de ce rapport C/N et discutant sa signification dans les vases marines; dans ces mêmes travaux, l'humus est dosé et le rôle des bactéries décomposant la matière organique est déterminé.

Dans un sens identique, des chercheurs russes ont étudié les vases lacustres des environs de Moscou (KONSHIN [1939], HARTULARI [1939]). Un livre entier est consacré à la chimie des vases (plus exactement à l'analyse chimique du complexe qu'est l'humus), par S. W. SOUCI (1938). Des biologistes, comme J. HJORT (1938), se sont également intéressés à la matière organique des vases, comme élément nutritif des animaux benthiques (1938). M<sup>me</sup> R. LUX a suivi le savant norvégien dans cette voie en dosant l'azote dans les vases littorales de Concarneau et de Monaco (1938-1939).

Les vases fluvio-marines avaient été, jusqu'à ce jour, laissées à peu près de côté, bien que la plupart des biologistes qui s'étaient occupés du milieu fluvio-marin aient occasionnellement signalé que leur teneur en matière organique était importante. Je me suis donc attaché à rechercher la teneur en matière organique totale des vases fluvio-marines par calcination (et élimination préalable des carbonates, quand il y a lieu), et à doser l'azote par l'appareil (micro-Kjeldahl) de Parnas et Wagner. Le rapport C/N a donc pu être établi.

On sait que les pédologues sont à peu près d'accord aujourd'hui pour admettre que le pourcentage de carbone dans la matière organique des sols est égal à 50 %. Si donc on dose la matière organique totale, on a le carbone en multipliant par 0,5, et inversement

la matière organique totale si on dose le carbone en multipliant par 2. Dans les résultats qui sont donnés ici, c'est ce rapport que j'ai adopté :

| Localisations géographiques                                | C %  | N %   | C/N   |
|------------------------------------------------------------|------|-------|-------|
| <b>I. — Estuaire de la Penzé.</b>                          |      |       |       |
| Toull Houarn : slikke (surface).....                       | 2,36 | 0,098 | 25,15 |
| » » (20 cm. de profondeur).....                            | 2,63 | 0,180 | 14,61 |
| Pont de la Corde : slikke (surface).....                   | 4,10 | 0,262 | 15,66 |
| » » (20 cm. de profondeur).....                            | 3,45 | 0,280 | 12,32 |
| Pont du chemin de fer : schorre (surface).....             | 4,13 | 0,288 | 14,34 |
| Village de Penzé : slikke (surface).....                   | 4,15 | 0,350 | 11,86 |
| Penzornou-chenal (surface).....                            | 3,11 | 0,525 | 5,92  |
| <b>II. — Estuaire de la Loire (voir la carte, fig. 4).</b> |      |       |       |
| 41.....                                                    | 3,18 | 0,14  | 22,71 |
| 43 bis.....                                                | 2,77 | 0,12  | 23,08 |
| 48.....                                                    | 2,50 | 0,115 | 21,74 |
| 50.....                                                    | 2,55 | 0,091 | 28,02 |
| 52.....                                                    | 7,91 | 0,28  | 28,28 |
| 54.....                                                    | 5,04 | 0,14  | 36    |
| 55.....                                                    | 1,92 | 0,07  | 27,4  |
| 57.....                                                    | 6,85 | 0,20  | 34,25 |
| 62.....                                                    | 2,78 | 0,126 | 22,06 |
| 63.....                                                    | 4,63 | 0,161 | 28,75 |
| 67.....                                                    | 5,98 | 0,175 | 34,17 |
| 70.....                                                    | 1,53 | 0,07  | 21,86 |
| <b>III. — Estuaire de la Gironde.</b>                      |      |       |       |
| Slikke (4 km. en amont de Bordeaux).....                   | 4,90 | 0,18  | 17,22 |
| <b>IV. — Estuaire du Bou-Regreg.</b>                       |      |       |       |
| Bac Salé-Rabat : slikke (surface).....                     | 4,10 | 0,14  | 29,28 |
| Passerelle chemin de fer : slikke (surface).....           | —    | 0,14  | —     |
| Villa d'été du Pacha : slikke (surface).....               | 4,12 | —     | —     |
| Confluence oued Akrech : slikke (surface).....             | 2,43 | —     | —     |

Que peut-on retenir de ces résultats ?

a) Le pourcentage de matière organique est toujours élevé dans les échantillons étudiés, bien que variant cependant dans des limites assez larges, mais la valeur moyenne qui doit être retenue est de l'ordre de 8 à 10 % (4 à 5 % de C).

b) L'azote total est relativement peu abondant; mais il est bon de remarquer que le pourcentage d'azote est en moyenne plus grand dans les vases de la Penzé que dans les vases de la Loire. Le rapport C/N varie du simple au double en moyenne, pour les vases de ces deux estuaires. Dans un même estuaire, le rapport C/N apparaît comme sensiblement constant, ainsi que les graphiques (fig. 81) le montrent. Ces résultats semblent être en accord avec ceux obtenus avec les vases de la Tees et que la figure 82 représente.

*Origine de la matière organique :* On a déjà dit et répété que la vase apparaissait macroscopiquement comme un ensemble homogène : il est très rare que l'on puisse discerner, à l'œil, des fragments reconnaissables de végétaux; parfois, cependant, on rencontre des débris d'algues non encore décomposés. Au microscope, la matière organique n'est guère plus distincte. Elle apparaît en granules noirâtres enduisant et liant tous les grains inorganiques. Ce n'est qu'exceptionnellement que JACQUES BOURCART et moi-

même (1939) avons pu observer, dans les sables vaseux provenant de la baie de Morlaix, une matière organique verdâtre, à peine décomposée et qui ne pouvait provenir que de fragments d'algues vertes arrachés au fond. C'est pourquoi J. BOURCART (1939) a donné le nom d'algon à ce stade peu avancé de décomposition de la matière organique.

Par ailleurs, comme on le verra plus loin, on distingue, au microscope, une microflore et une microfaune vivant en surface ou en profondeur. Ses squelettes inorganiques, calcaires ou siliceux, indiquent une origine évidente de la matière organique des vases.

WAKSMAN, CAREY, SELMAN et CORNELIA (1933) ont montré que la décomposition du zooplancton et du phytoplancton est très rapide dans l'eau de mer et dans les vases : le carbone dégage du  $\text{CO}_2$  et l'azote se libère sous forme d'ammoniaque. Toutefois, disent les auteurs, elle est plus rapide dans les vases que dans l'eau par suite d'une pullulation plus grande des bactéries.

Sauf en temps de crues, ou en hiver, et toujours exceptionnellement, tout au moins

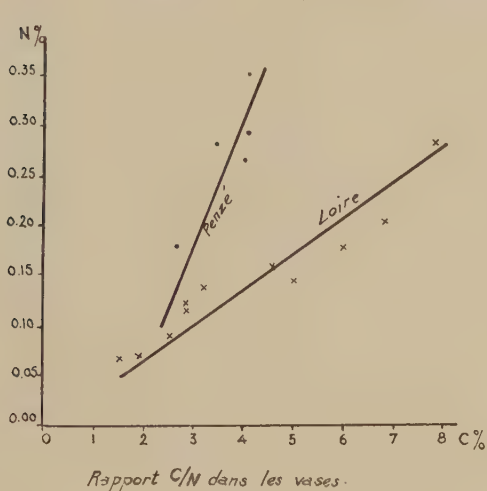


FIG. 81.

FIG. 81. — Le rapport C/N dans les vases de l'estuaire de la Penzé et dans celles de la Loire.

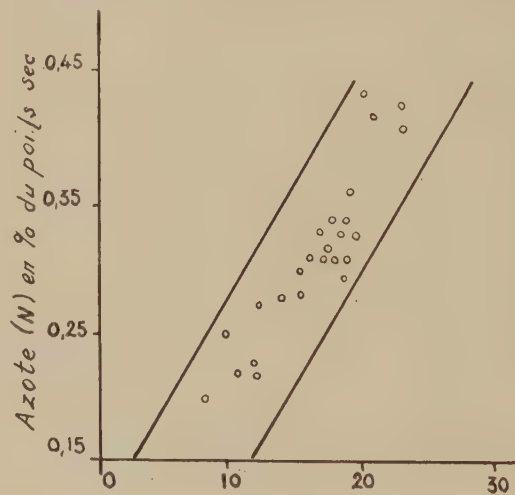


FIG. 82.

FIG. 82. — Le rapport C/N dans les vases de l'estuaire de la Tees.

dans les petits estuaires que j'ai étudiés, le fleuve ne transporte pas de débris organiques : feuilles, bois morts, etc... Par contre, il est fréquent, dans l'estuaire, de voir flotter entre deux eaux des débris d'algues. Le plancton, tant animal que végétal, est abondant; mais, comme on le sait depuis longtemps, c'est le phytoplancton qui domine.

Il y a à la fois dans un estuaire du plancton marin et du plancton d'eau douce. Le plancton d'eau douce, ainsi que l'ont montré les biologistes anglais qui ont étudié l'estuaire de la Tees, domine nettement en surface, alors qu'au fond, c'est le plancton marin. Il peut être intéressant de reproduire ici les nombres moyens de la Diatomée *Coscinodiscus* et de Copépodes marins pris en trois minutes de halage d'un filet à plancton à mailles moyennes, en automne et en hiver 1931-1932.

A côté de l'apport planctonique indiscutable, la matière organique peut être fournie, dans certains cas, par la décomposition *in situ* d'algues vivant sur la vase ou à proximité de la vase; je pense notamment au *Fucus lutarius*, aux Entéromorphes, etc...

| Distance de la mer<br>en mètres | Coscinodiscus |      |           |      | Copépodes marins |      |           |      |
|---------------------------------|---------------|------|-----------|------|------------------|------|-----------|------|
|                                 | Haute mer     |      | Basse mer |      | Haute mer        |      | Basse mer |      |
|                                 | Surface       | Fond | Surface   | Fond | Surface          | Fond | Surface   | Fond |
| 25.200.....                     | 0             | 0    | 0         | 0    | 1                | 1    | 0         | 0    |
| 22.500.....                     | 0             | 4    | 0         | 0    | 1                | 6    | 0         | 0    |
| 19.800.....                     | 0             | 3    | 0         | 0    | 4                | 24   | 0         | 5    |
| 17.100.....                     | 0             | 6    | 0         | 6    | 12               | 74   | 0         | 4    |
| 14.400.....                     | 0             | 10   | 0         | 0    | 21               | 125  | 30        | 0    |
| 11.700.....                     | 0             | 27   | 2         | 0    | 8                | 111  | 0         | 0    |
| 9.000.....                      | 0             | 120  | 1         | 10   | 19               | 164  | 2         | 7    |
| 6.300.....                      | 4             | 108  | 1         | 30   | 27               | 262  | 63        | 370  |

Enfin, il ne faut pas oublier le grand nombre d'individus de Scrobiculaires, Myes, Cardium, moules, huîtres et annélides, qui fournissent sans aucun doute un apport organique non négligeable.

La sécrétion du mucus par les huîtres a fait penser à G. RANSON (1927) qu'on pouvait voir là également une origine de la concentration de la matière organique dans les vases d'estuaires. Selon l'auteur, ce mucus serait même indispensable à la fixation des vases. Cette hypothèse, qui n'a pas un caractère de généralité et qui reste, en tout état de cause, à vérifier, ne peut être retenue.

En résumé, il semble que l'on puisse distinguer deux origines probables de la matière organique des vases : une origine *in situ*, due à la décomposition des animaux et des plantes vivant sur la vase ou dans la vase, et un apport extérieur, sous forme de plancton qui se sédimente à chaque marée.

Il y a donc à la fois un apport animal et un apport végétal. Le tissu animal, composé de protéines, a une forte teneur en azote; les végétaux, bien qu'étant surtout constitués de composés ternaires, possèdent pourtant des tissus protéiques et donc une certaine teneur en azote. A titre simplement indicatif, je donnerai les résultats de quelques dosages que j'ai effectués :

|                                                                      | C %   | N %  | C/N  |
|----------------------------------------------------------------------|-------|------|------|
| <i>Enteromorpha</i> .....                                            | 38    | 1,84 | 20,6 |
| <i>Fucus vesiculosus</i> .....                                       | 41    | 1,50 | 27,3 |
| <i>Fucus serratus</i> .....                                          | 41,65 | 1,83 | 22,7 |
| <i>Pelvetia canaliculata</i> .....                                   | 41    | 2,20 | 18,6 |
| Plancton total de l'estuaire de la Penzé à Penzornou (mi-marée)..... | 16,75 | 3,29 | 5,09 |

Si l'on admet, en approximation très grossière, que le carbone représente 50 % de la perte au feu des tissus des algues, on voit que le rapport C/N pour les algues est égal, respectivement, à 20,6, 27,3, 22,7, ou, si l'on préfère, égal en moyenne à 22,6. Cette valeur du rapport C/N, aussi grossièrement approchée qu'elle est, donne cependant un résultat intéressant, car elle n'est pas éloignée de la valeur moyenne de ce même rapport dans les vases.

Les chiffres concernant le plancton total ne doivent pas surprendre, car, au plancton proprement dit, s'ajoute ici une importante fraction inorganique (poudre quartzeuse);

mais le rapport C/N est cependant très peu élevé, ce qui montre bien l'importance de la matière organique animale. La décomposition de ce plancton, une fois déposé sous forme de vase, libère l'azote sous forme d'ammoniaque. Ceci peut être une explication de la faible teneur en azote des vases; mais aussi peut-être, dans une certaine mesure, de leur alcalinité.

La considération du tableau général, donnant les pourcentages en carbone et en azote dans les vases, a permis de constater des différences appréciables entre les échantillons provenant de divers estuaires et même entre les échantillons d'un même estuaire. On peut se demander à quoi sont dues ces différences. Les travaux de R. Lux (1938) donnent déjà quelques idées. Voici quelques-uns de ses résultats :

| Localisations et appellations                      | Teneur moyenne en azote en % |
|----------------------------------------------------|------------------------------|
| Vase molle des Glénans par 40 m. de fond .....     | 0,306                        |
| Sable vaseux de Beg Meil par 20 m. de fond .....   | 0,120                        |
| Sable à Arénicoles de Pouldohan (Concarneau) ..... | 0,058                        |
| Sable littoral » » .....                           | 0,020                        |

S'il apparaît que la vase molle a une teneur en azote qui se rapproche des valeurs qui ont été données pour les estuaires, on remarquera aussi que cette teneur en azote diminue avec les sables vaseux, puis avec les sables. Ceci tient évidemment à ce que ces sédiments contiennent de moins en moins de matière organique.

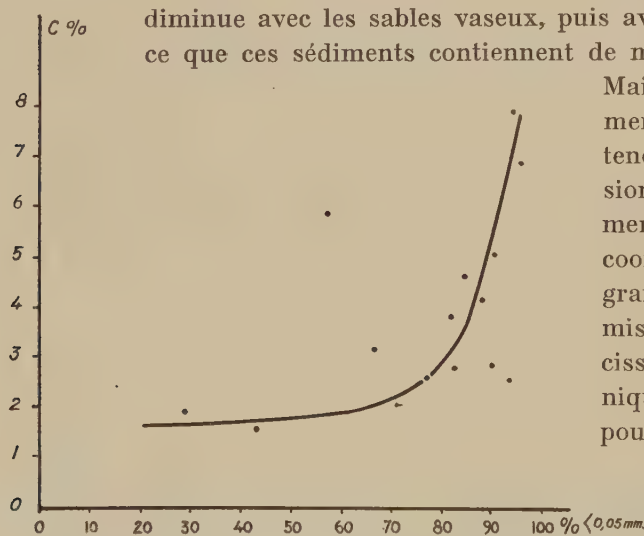


FIG. 83. — Rapport entre la teneur en matière organique et la dimension des éléments composant les vases.

Mais on peut aussi se demander si, justement, il n'y a pas un rapport entre la teneur en matière organique et la dimension des grains qui constituent le sédiment. C'est ainsi que si, sur des axes de coordonnées, on porte le pourcentage des grains ou particules qui passent le tamis 300 (diamètre < 0 mm. 05) en abscisse, et le pourcentage de matière organique (exprimée en carbone) en ordonnée, pour un grand nombre d'échantillons de vase d'estuaire, il semble qu'il soit permis de tracer la courbe qui est figurée ci-contre (fig. 83).

Cette courbe montre qu'à mesure que le sédiment devient plus fin, la teneur en matière organique est plus élevée. On peut, sans doute, en chercher l'explication dans le fait que la matière organique est plus ou moins adsorbée à la surface des grains et que, lorsque leur surface spécifique augmente, la teneur en matière organique croît dans le même sens. Il semble donc que, du point de vue biologique, l'étude granulométrique des sédiments doive être entreprise corrélativement avec celle des constituants chimiques.

Mais les recherches de R. Lux (1939) sont intéressantes à un autre point de vue.

Elles ont montré que la teneur en azote des vases marines, ou, plus exactement, de la pellicule de surface de ces vases, ne demeure pas constante toute l'année. L'auteur a pu mettre en évidence des variations saisonnières assez notables : la teneur en azote est plus élevée à Beaulieu (Méditerranée) au printemps qu'en automne. Ces variations seraient en rapport avec des facteurs biologiques locaux. Il est possible, et même vraisemblable, que de telles variations existent également dans la pellicule des vases d'estuaire, variations liées à la densité de la vie microscopique et macroscopique qui existe au sein de ces sédiments, mais je n'ai pas effectué de mesures qui me permettent d'assurer l'existence de ces variations.

*Nature de la matière organique* : Les travaux de BOYSEN-JENSEN (1914), APSTEIN (1916), sur les vases littorales de la Mer du Nord; ceux, beaucoup plus récents, de WAKSMAN (1933-1938) et de ses collaborateurs, sur les vases littorales du Golfe du Maine; ceux de J. BOURCART et P. PÉREAU (1941) ont montré que la matière organique dans les vases se trouvait à l'état de complexe.

Par une méthode, sensiblement analogue à celles de SVEN ODEN (1919) ou de SCHREINER et SHOREY (1910), adoptées en pédologie, J. BOURCART et P. PÉREAU (1941) ont étudié quelques échantillons de vases d'estuaires. Leurs résultats sont les suivants :

| Localités                         | Ap % | As % | Bp % | Bs % | % total<br>de fractions<br>extraites | Reste % |
|-----------------------------------|------|------|------|------|--------------------------------------|---------|
| Aulne à Trégarvan .....           | 4,3  | 2,7  | 1,2  | 0,7  | 8,9                                  | 91      |
| Slikke de Tudy .....              | 2,8  | 0,7  | 0,8  | 0,1  | 4,4                                  | 95,3    |
| Slikke de l'Orne (aval Caen)..... | 0,1  | 0,8  | 1,5  | 2,9  | 5,3                                  | 95      |

Ap représenterait la cello-dextrine : As, des sels organiques de fer : ces deux fractions sont extraites de la vase par ébullition dans l'eau distillée. Bp serait notamment les acides humiques, et Bs, les fulvo-acides (Sv. Oden) : ces fractions sont extraites par ébullition dans une lessive de soude diluée.

On en vient donc à étudier la matière organique des vases comme on étudie celle des sols cultivables. La littérature concernant la chimie des sols, et particulièrement celle de la matière organique, est abondante : des livres entiers y sont consacrés, tel celui récent de S. W. SOUCI (1938). Mais il semble inutile, ici, d'insister sur ce sujet, d'autant plus que l'accord entre les divers auteurs ne semble pas complet. On retiendra simplement que la matière organique de la vase, à l'origine composée essentiellement par des amino-acides (protéines), et des glucides (cellulose), subit une série de transformations qui aboutissent finalement à donner un complexe organique que, la plupart du temps, il est convenu d'appeler humus, depuis VAN BEMMELEN.

C'est cet humus, ou matière noire, qui donne, en grande partie, sa couleur à la vase; c'est, d'autre part, au fait qu'il est constitué par des colloïdes humiques que la vase doit sa plasticité d'ensemble.

Comment la matière organique initiale est-elle transformée en humus ? Répondre à cette question serait exposer le mécanisme de plusieurs activités microbiennes. Il existe une grande quantité de Bactéries aérobies qui transforment les matières orga-

niques en humus, et ces Bactéries trouvent, dans les vases d'estuaire, un milieu alcalin qui leur est favorable. Il va sans dire que, lorsque le milieu devient anaérobie, d'autres Bactéries interviennent qui continuent le travail des précédentes, et, sans doute, dans une fermentation analogue à celle qui préside à la fabrication du fumier (fermentation butyrique) par le Bacille amylobacter, la putréfaction de la matière organique des vases est complète. C'est d'ailleurs ce que l'on peut facilement observer, au laboratoire, lorsqu'on laisse, dans un bocal à l'abri de l'air, de la vase fraîche et non encore putréfiée : elle ne tarde pas à noircir et à pourrir complètement; toute vie aérobie disparaissant, la vase n'est plus en but qu'aux actions des anaérobies.

On retiendra donc que la vase des estuaires ressemble, par la nature et l'évolution de sa matière organique, aux vases marines étudiées notamment par S. A. WAKSMAN et ses collaborateurs, aux tourbes, aux vases d'eau douce et, d'une façon encore plus générale, aux sols terrestres.

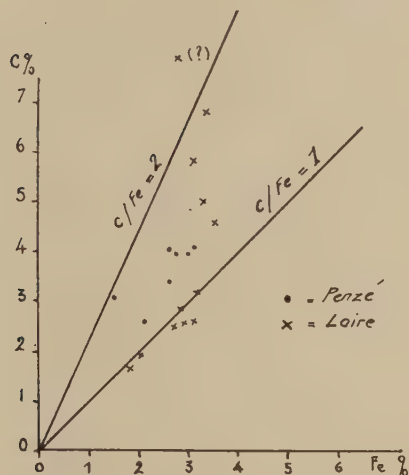


FIG. 84. — Rapport de la teneur en carbone à la teneur en fer dans les vases des estuaires de la Penzé et de la Loire.

2° *Le fer et le soufre.* — Ces deux éléments sont groupés dans un même paragraphe, car leur mutuelle combinaison, à l'état de sulfure de fer, est certainement l'un des traits les plus caractéristiques de la chimie et de l'évolution des vases. Tous les auteurs sont d'accord pour avoir reconnu ce sulfure de fer dans les sédiments vaseux de la Mer Noire (auteurs russes), de la Mer du Nord, des océans et même des lagunes et étangs littoraux. C'est au sulfure de fer qu'est imputée (bien plus qu'aux matières organiques) la couleur noire des vases.

Il arrive cependant que le fer ne soit pas combiné au soufre et, dans ce cas, la vase prend une couleur plus claire, presque jaune; parfois, il y a tout lieu de croire que le fer se trouve, dans ce cas, à l'état d'hydroxyde.

*Teneur en fer des vases :* Il est intéressant, avant d'envisager sous quelle forme on trouve le fer dans les vases, de connaître leur teneur en cet élément. Le dosage du fer total dans les vases a été effectué, après calcination de la matière organique, soit par la méthode Margueritte, au permanganate de potasse, soit par la méthode colorimétrique (coloration du fer ferrique par le sulfocyanure de potassium). Les résultats obtenus pour différents échantillons de vases d'estuaire sont donnés dans le tableau de la page 275, dans lequel la teneur en carbone, qui permet d'effectuer le rapport C/Fe, est également donnée.

La teneur en fer des sédiments fluvio-marins est donc élevée, puisque, au moins pour celle des estuaires bretons, elle apparaît comme étant égale, en moyenne, à la teneur en carbone. Mais de telles valeurs ne sont cependant pas surprenantes, car si on se réfère aux travaux de MURRAY et RENARD, on constate que les teneurs en fer, pour les vases bleues marines (échantillons moyens), sont respectivement égales à 3,88 % et 2,91 % (fer exprimé en Fe).

| Localisations géographiques                         | C %  | Fe % | C/Fe |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|
| I. — Estuaire de la Penzé.                          |      |      |      |
| Tour Hassan : slikke (20 cm. de profondeur).....    | 2,63 | 2,1  | 1,25 |
| Pont de la Corde : slikke (surface).....            | 3,45 | 2,6  | 1,32 |
| » » » (20 cm. de profondeur).....                   | 4,10 | 3,1  | 1,32 |
| Pont de chemin de fer : slikke (surface).....       | 4,02 | 3    | 1,30 |
| » » » schorre (surface).....                        | 4,13 | 2,7  | 1,54 |
| Penzornou : chenal.....                             | 3,11 | 1,5  | 2,07 |
| Village de Penzé : slikke (surface).....            | 4,15 | 2,58 | 1,60 |
| II. — Estuaire de la Loire (voir la carte, fig. 4). |      |      |      |
| 41.....                                             | 3,18 | 3,12 | 1,01 |
| 43 bis.....                                         | 2,57 | 3,12 | 0,88 |
| 48.....                                             | 2,50 | 2,72 | 0,92 |
| 50.....                                             | 2,55 | 2,94 | 0,86 |
| 52.....                                             | 7,91 | 2,75 | 2,87 |
| 54.....                                             | 5,04 | 3,25 | 1,55 |
| 55.....                                             | 1,92 | 2    | 0,96 |
| 57.....                                             | 6,85 | 3,32 | 2,06 |
| 62.....                                             | 2,78 | 2,85 | 0,97 |
| 63.....                                             | 4,63 | 3,50 | 1,32 |
| 67.....                                             | 5,98 | 3    | 1,99 |
| 70.....                                             | 1,53 | 1,80 | 0,85 |
| III. — Estuaire de la Gironde.                      |      |      |      |
| Slikke (4 km. en amont de Bordeaux).....            | 4,90 | 3,15 | 1,52 |
| IV. — Estuaire du Bou-Regreg.                       |      |      |      |
| Bac Salé-Rabat : slikke (surface).....              | 4,10 | 2,81 | 1,45 |
| Villa d'été du Pacha : slikke (surface).....        | 4,12 | 6,05 | 0,68 |
| Confluence oued Akrech : slikke (surface).....      | 2,43 | 4,70 | 0,51 |

Par ailleurs, une teneur en fer de l'ordre de 2 à 3 % est une valeur courante pour les limons subaquatiques (B. BRAJNIKOV [1942]).

Le rapport du carbone au fer est assez variable d'un échantillon à l'autre, surtout dans l'estuaire de la Loire; mais, en moyenne, il est égal à 1,35, valeur sensiblement égale à celle obtenue pour les vases de la Penzé (fig. 84). Ce rapport, que B. BRAJNIKOV (1941) appelle M, peut être un des indices servant à distinguer les vases des limons. Comme cet auteur l'a signalé, M semble beaucoup plus faible dans les limons que dans les vases.

*Origine et nature du fer dans les vases* : L'origine du fer dans les vases pose un problème qu'il n'est pas facile, en l'état actuel de nos connaissances, de résoudre complètement d'une manière satisfaisante. Les océanographes, MURRAY et RENARD (1891), puis COLLET (1908), supposent implicitement que le fer des vases bleues a une origine terrigène et qu'il se trouve, à la surface de ce sédiment, à l'état d'hydroxyde. Mais sous quelle forme le fer est-il amené à ces dépôts ? est-ce en solution dans l'eau ? est-ce sous forme de patine ou d'enduit entourant les grains minéraux ?

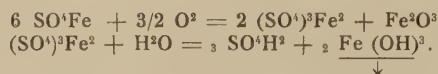
La teneur en fer des eaux fluviales et marines est toujours très faible, de l'ordre maximum de 0 mgr. 1 (1).

(1) Les résultats de dosage du fer dans l'eau de mer sont les suivants : eaux de la Manche (Harvey [1928]), 0 mgr. 003 par 1.000 cc. ; 0 mgr. 06 pour les eaux tropicales de l'Atlantique (Wattenberg [1927]) ; 0 mgr. 02

Si on admet grossièrement que la teneur en eau d'un sédiment type vase est égale à 100 %, on voit donc que la quantité de fer dans les eaux d'imbibition devrait être de 0 mgr. 004 pour 100 gr. de vase sèche. On peut aussi penser que le fer provient de la décomposition sur place de minéraux contenant du fer (olivine, hornblende, etc...); mais, du moins dans les vases littorales, ils sont inexistantes ou très peu abondants. CAYEUX (1922) a abordé ce problème au cours de ses recherches sur le minerai de fer oolithique de France. Selon l'auteur, les minerais de fer oolithiques se seraient déposés en mer dans des conditions physicochimiques de milieu marin, très particulières et différentes de celles qui existent aujourd'hui. L'origine même du fer serait continentale, c'est-à-dire qu'il aurait été conduit aux océans en solution dans les eaux fluviales. Quoique très faible, la teneur en fer des eaux fluviales aurait été suffisante pour être à l'origine de ces importants gisements. Mais L. CAYEUX suppose cependant que ce dépôt s'est effectué à des moments des révolutions géologiques, où l'érosion était beaucoup plus intense qu'à l'heure actuelle et où, par conséquent, la teneur en fer des eaux fluviales pouvait être bien plus élevée que de nos jours.

Très récemment, A. RIVIÈRE (1942) s'est préoccupé de la sédimentation ferrugineuse en milieu marin. Il pense qu'il s'agit là d'un phénomène purement physicochimique. Il a constaté que les sels ferreux sont solubles dans l'eau de mer (plusieurs grammes par litre), à condition que le pH soit acide et le milieu réducteur, et que, si une solution de sels ferreux est oxydée par aération, les sels ferreux se transforment en sels ferriques; mais que ceux-ci s'hydrolysant, de l'hydrate ferrique précipite.

• On peut écrire :



Mais la libération d'acide peut dissoudre à son tour l'hydrate ferrique et la réaction se trouve donc limitée, à moins qu'elle n'ait lieu en présence de carbonate de calcium en quantité suffisante pour neutraliser l'acide.

Ce processus pourrait donc être envisagé pour expliquer l'abondance du fer dans les sédiments marins ou fluvio-marins. Cependant, l'eau douce, saumâtre ou marine, ne contient pas, à l'heure actuelle, plusieurs grammes de fer par litre; et le pH des eaux marines est alcalin et non acide, le milieu aqueux est généralement oxydant.

A. RIVIÈRE ne tente d'ailleurs pas d'expliquer la présence remarquable de fer dans les vases. Il l'admet. Et comme il a constaté que le pH des vases est « fréquemment relativement acide » et que le milieu est réducteur, il pense que, lors de remise en suspension des vases, le fer qu'elles contiennent passe en solution ferreuse et précipite ailleurs, là où le milieu est oxydant et où le carbonate de calcium est abondant pour former des sédiments du type de ceux étudiés par L. CAYEUX. A. RIVIÈRE a pu constater qu'effectivement les vases constituent un milieu réducteur (ce qui avait été signalé depuis longtemps) et que leur pH est acide (ce qu'il est le seul à avoir constaté, voir p. 286).

En effet, n'était cette condition de pH acide, les processus qu'il envisage seraient très séduisants pour expliquer la formation des gisements de fer.

Mais je ne suis pas, dans ces conditions, de l'avis de A. RIVIÈRE quand il écrit « qu'il ne semble donc plus nécessaire de faire appel à un rôle actif des Ferrobactéries. En réalité, les données biologiques semblent indiquer qu'elles se rencontrent à peu près partout où les conditions physicochimiques sont telles que du fer peut se précipiter (notamment à l'état d'hydrate ferrique) ».

dans les eaux du Golfe du Maine (G. E. Seiwel [1935]). L'eau fluviale de la Penzé contenait, au mois de septembre 1941, 0 mgr. 04 pour 1.000 cc.; celle de l'estuaire et celle, marine, de la baie de Morlaix, une quantité analogue.

En effet, comme on le verra : le pH des eaux d'estuaire est toujours alcalin et le milieu n'est pas toujours réducteur. La teneur en fer de ces mêmes eaux est infime et on peut se demander si la seule précipitation physicochimique, si elle peut avoir lieu, suffit à rendre compte des teneurs en fer des vases d'estuaires.

Le problème de l'origine du fer dans les vases est donc difficile à résoudre. Il existe cependant un groupe de Bactéries, les Ferrobactéries, dont le rôle et l'activité ont été signalés depuis très longtemps. Il ne peut être question ici de faire une étude détaillée de ces Bactéries qu'aucun travail personnel ne viendrait justifier. Mais un bon résumé concernant leurs caractéristiques et leur métabolisme existe, d'une part, dans le livre de E. KAYSER (1921), et, d'autre part, dans le travail, particulièrement intéressant pour les géologues, de E. C. HARDER (1919). Les découvertes essentielles concernant ce groupe de Bactéries sont dues à S. WINOGRADSKY (1891), MOLISCH (1910) et LIESKE (1).

Ce sont essentiellement des Bactéries filamenteuses, strictement aérobies, de grandes dimensions, colorées en jaune, à l'état adulte, par du fer ferrique. D'après LIESKE, on doit distinguer deux types : 1° le type *Leptothrix* : la vie saprophytique sur milieu organique est possible, mais le régime normal est autotrophe, exigeant des sels manganeux ou ferreux et  $\text{CO}_2$  pour toute source de carbone; les sels passent à l'état manganique ou ferrique fournissant l'énergie nécessaire à la réduction de  $\text{CO}_2$ ; 2° le type *Spirophyllum* : la vie hétérotrophe est impossible, les composés carbonés sont nuisibles (comme pour les Bactéries nitrifiantes); le régime autotrophe obligatoire comporte la présence de  $\text{CO}_2$  et de carbonate ferreux (à l'exclusion de tout autre sel).

Il semble donc, *a priori*, que dans les estuaires on doit trouver plutôt des Ferrobactéries du type *Leptothrix*. J. BOURCART a pu effectivement constater que les vases de la slikke, dans l'estuaire de la Penzé, contiennent, dans la pellicule superficielle, à côté d'un grand nombre de Diatomées, des Ferrobactéries du genre *Crenothrix*.

Ces Bactéries contribuent, avec d'autres Bactéries, des Diatomées et des Cyanophycées, à constituer des voiles à la surface de la slikke et lui donnent cet aspect jaunâtre, brillant et gluant.

Il n'est d'ailleurs pas nouveau de constater l'existence de Ferrobactéries à la surface des vases des estuaires : elles avaient été signalées pour la première fois par EHRENBURG dans les vases fluvio-marines de la Mer du Nord. COHN, puis WINOGRADSKY, avaient déjà émis l'hypothèse que les dépôts « limoneux » riches en fer devaient leur concentration en cet élément à l'existence des Ferrobactéries.

En résumé, ce qui est, ici, important, c'est de savoir qu'il existe, à la surface des vases, des Bactéries capables de concentrer le fer à l'état d'hydroxyde.

On peut donc retenir trois origines possibles du fer contenu dans les vases :

a) *Origine détritique*, sous forme de patine entourant les particules et grains transportés par les eaux. Un bassin versant comprenant des formations limoneuses, des formations rouges du type de la *terra rossa* ou de la latérite, peut fournir une certaine quantité de fer.

b) *Origine chimique*, par la précipitation du fer en solution dans les eaux par le processus décrit par A. RIVIÈRE.

c) *Origine biochimique*, grâce à l'action des Ferrobactéries qui concentrent, par leur métabolisme, le fer en solution dans les eaux sous forme d'hydroxydes.

(1) Voir sur ce sujet : *Les idées modernes sur le mécanisme de la photosynthèse*. Actual. Sci. et Indust. Hermann, 1941, n° 894.

Toujours est-il que, comme le pensait COLLET, le fer des sédiments marins ou fluvio-marins existe, en premier lieu, dans les vases sous une forme oxydée.

Ce fer ferrique va subir, maintenant, au sein du sédiment, une série de transformations qui aboutissent à un sulfure de fer et même parfois à un bisulfure de fer. C'est ici qu'intervient le cycle du soufre dans les sédiments, très bien étudié par les auteurs russes et allemands.

Ce sont encore des Bactéries, les Sulfobactéries, qui règlent le cycle du soufre. Parmi les Sulfobactéries, les sulfuraires ont surtout été étudiées (S. WINOGRADSKY, KEIL, LIESKE, WAKSMAN et STARKEY). Ces Bactéries oxydent l'hydrogène sulfuré ( $H^2S$ ) du milieu où elles vivent en soufre qui se dépose dans le protoplasme. Une source d'hydrogène sulfuré est donc nécessaire. Les travaux de SILDERBERG et de WEINBERG, sur les vases des limans de la Mer Noire, ont montré qu'il existe, effectivement, un groupe de Bactéries possédant la propriété de produire l' $H^2S$  aux dépens des sulfates alcalins contenus dans l'eau de mer. Il semble nécessaire de rapprocher ces résultats de ceux publiés par L. W. COLLET, qui explique la formation d'hydrogène sulfuré à partir des sulfates contenus dans l'eau de mer, par une suite de réactions chimiques où n'intervient pas de processus biochimiques :

Les sulfates seraient réduits par le carbone des matières organiques. Sans intervention bactérienne, ces réactions semblent difficilement acceptables. Plus récemment, R. LEGENDRE (1938) a constaté que des plaques de fer immergées dans des bacs d'eau de mer, se recouvraient d'un enduit gélatineux émettant une odeur d'œufs pourris. M. VEILLON en a isolé le *Vibrio desulfuricans*, anaérobie qui réduit les sulfates de l'eau de mer.

Qu'on envisage donc un processus chimique ou un processus biochimique, la formation d'hydrogène sulfuré aux dépens des sulfates ne peut être mise en doute. Cet  $H^2S$  est alors oxydé par les sulfuraires : le produit d'oxydation pouvant être le soufre, l'anhydride sulfureux ( $SO^2$ ) ou même  $SO^3$ . Mais si cet  $H^2S$  est produit en milieu anaérobie, il ne peut être oxydé et il se combine alors au fer ferrique pour donner du sulfure de fer.

Tels sont les processus successifs, tant chimiques que biochimiques, qui interviennent, au sein des vases, pour aboutir à donner du sulfure de fer (monosulfure). C'est sous cette forme qu'il constitue un des éléments les plus caractéristiques des vases.

Mais différents auteurs, CHEVALIER (1915), et plus récemment C. ROEHRICH (1941), ont signalé l'existence de petits cristaux de pyrite ( $FeS^2$ ), soit dans les vases des étangs du littoral méditerranéen, soit dans le bri charentais, formation qui doit être considérée comme une vase ancienne.

Il y a donc tout lieu de croire que la réduction du fer ferrique peut être poussée encore plus loin que le monosulfure et qu'elle aboutit finalement à la forme infiniment plus stable et cristallisée qu'est la pyrite.

L'hydroxyde ferrique peut être aussi concentré par le phytoplancton (COOPER, 1935; HARVEY, 1937).

On s'est souvent demandé si fer et matière organique étaient seulement juxtaposés dans les vases, ou au contraire s'il existe, par exemple, des sels organiques de fer. Il est vraisemblable de croire qu'une partie du fer s'associe à la matière organique. Quelques dosages que j'ai effectués confirment cette façon de voir :

|        |                                            | Fe %<br>sans calcination<br>de l'échantillon | Fe %<br>après calcination<br>de l'échantillon |
|--------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Penzé. | { Pont de la Corde (surface) .....         | 2,06                                         | 2,60                                          |
|        | { Viaduc (schorre) .....                   | 2,60                                         | 2,67                                          |
|        | { Toull Houarn (20 c. de profondeur) ..... | 1,40                                         | 2,10                                          |

Peut-on parler d'humates de fer ? Sans doute, mais il serait nécessaire qu'un chimiste s'intéresse à cette question, afin d'y répondre plus sûrement.

Comme on vient de le voir, la matière organique contenue dans les vases est, sous l'action des Bactéries, décomposée, désagrégée, pourrait-on dire, jusqu'au stade de l'humus qui est un complexe colloïdal qui semble à peu près stable tant que les vases demeurent dans les mêmes conditions de milieu.

De son côté le fer, par l'action d'autres Bactéries, tend à devenir sulfure de fer très finement divisé et colloïdal.

Les deux colloïdes organiques possèdent la propriété bien connue d'absorber de grandes quantités d'eau et de se gonfler de telle sorte qu'ils constituent une gelée, une sorte de pâte. La pâte ferro-humique occupe de ce fait un très grand volume, c'est-à-dire que son poids spécifique est très petit. Cela explique d'ailleurs pourquoi les vases ont une teneur en eau d'autant plus élevée que le pourcentage des fractions fines est plus grand : c'est que la fraction fine se compose précisément de ces colloïdes hydrophiles. Les grains minéraux se trouvent noyés dans la gelée colloïdale et, s'ils sont eux-mêmes très fins, l'homogénéité macroscopique de la vase devient totale.

La vase apparaît donc bien, tant du point de vue dimensionnel que du point de vue chimique, comme un sédiment complexe, mais qui garde cependant un aspect d'ensemble très caractéristique et qui, du point de vue de ses propriétés physiques, comme de celui de ses échanges avec le milieu extérieur, doit être envisagé comme un ensemble.

#### 4. — Interactions du milieu et du sédiment (vase).

Comme on l'a vu, la vase est imbibée d'eau, car elle est recouverte périodiquement par la marée. Suivant sa structure et sa localisation, sa teneur en eau est plus ou moins élevée. Suivant son éloignement de l'embouchure et aussi son niveau, elle est recouverte par des eaux différentes surtout par leur salinité, mais aussi par d'autres facteurs physico-chimiques. La vase, ainsi imbibée, constitue un milieu très différent de ce que peut être un sédiment géologique : des êtres vivants l'habitent, depuis certaines espèces macroscopiques comme les Myes, jusqu'aux innombrables Diatomées, Bactéries et, plus généralement, une très grande variété d'êtres microscopiques. Toute cette vie, au sein même de la vase, et intimement mêlée à elle, en fait, dans son ensemble, un milieu global vivant qui a, naturellement, des échanges avec le milieu extérieur. Par ailleurs, la présence de matière organique finement divisée, le dégagement, par suite d'actions bactériennes, de gaz comme l'hydrogène sulfuré, en font, quand les conditions d'oxygénation ne sont plus assez intenses, un milieu éminemment réducteur que l'on pourrait étudier avec soin grâce à la notion du potentiel d'oxydo-réduction (rH).

Quelques auteurs, et certains déjà anciens, ont étudié les échanges du milieu extérieur avec la vase sous-marine. J'ai tenté aussi quelques recherches dans ce sens.

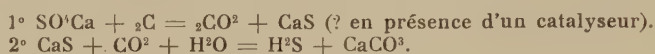
I. RECHERCHES DE MURRAY ET IRVINE (1893) SUR L'EAU D'IMBIBITION DES VASES BLEUES. — Les vases étudiées par les deux grands savants ne sont pas océaniques, mais typiquement littorales : elles proviennent de Granton (2-3 m. de profondeur) et du Firth of Forth (30 m.). Caractéristique de la vase : couleur noire.

L. W. COLLET a résumé leurs travaux (1908).

Les chlorures sont en plus grande proportion dans l'eau incluse des vases que dans l'eau de mer (79,019 %, contre 77,758 % pour le chlorure de sodium; 11,222, contre 10,878 pour le chlorure de magnésium). Par contre, les sulfates (acide sulfurique) sont en très nette diminution dans les eaux d'imbibition. Mais l'alcalinité de l'eau d'imbibition est en augmentation sur celle de l'eau de mer qui recouvre immédiatement la vase. Elle n'est pas exprimée en pH, puisqu'à cette époque la notation était inconnue, mais en grammes de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  pour 100 gr. :

|                                                 |                    |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| Eau d'inclusion de la vase de Queensferry ..... | 0,3395             |
| » » Port de Granton.....                        | 0,6804             |
| » » Marine station (hiver).....                 | 0,6880             |
| » » » (été) .....                               | 1,3737             |
| Eau de mer recouvrante .....                    | de 0,1072 à 0,1200 |

Cette alcalinité aurait pour origine la décomposition des sulfates de l'eau de mer par la matière organique des vases, puis la décomposition des sulfures ainsi produits par l'anhydride carbonique, suivant les réactions indiquées :



On peut donc ajouter que, si ces réactions ont réellement lieu, il s'ensuit que, par suite du dégagement d'hydrogène sulfuré, on a affaire à un milieu essentiellement réducteur. En conclusion, on peut extraire trois points des recherches de MURRAY et IRVINE :

L'eau incluse dans les vases bleues est plus alcaline, plus réductrice, plus chlorurée que l'eau de mer.

II. LA SALINITÉ DES VASES. — C'est un fait bien connu que les dépôts marins récents émergés ont une assez forte teneur en sels, teneur qui conditionne la végétation phanérogamique et permet aux seules plantes halophiles de subsister. Celles-ci, à leur tour, ont d'ailleurs une influence sur le troupeau ovin dont la chair est particulièrement appréciée (mouton pré-salé).

Les mesures de salinité des vases ont été effectuées par un dosage des chlorures au nitrate d'argent, sur les eaux de lavage après ébullition de l'échantillon desséché à 110°.

La salinité d'un sédiment est intimement liée à l'eau qui le recouvre et l'imbibe. Les sels que contient un dépôt doivent être considérés comme un apport secondaire. Plus l'eau recouvrante d'un dépôt est salée, plus celui-ci contiendra de sels une fois desséché.

Mais, d'autre part, il est évident que plus la teneur en eau d'un sédiment est élevée, plus le pourcentage en sels de ce sédiment sera grand. La salinité d'une vase, par exemple, sera d'autant plus forte que les eaux d'imbibition seront plus salées et en plus grande proportion.

Comme on l'a vu, la teneur en eau augmente avec la finesse des particules. Si on considère la teneur en eau du sédiment et si l'on admet que la salinité de l'eau d'inclusion est égale à 35 ‰, on voit que la salinité du sédiment est d'autant plus grande que les particules qui le constituent sont plus fines :

| Dimensions<br>des éléments | Teneur<br>en eau moyenne ‰ | Salinité en ‰<br>du poids sec |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| < 1,168 et > 0,245         | 25                         | 0,875                         |
| < 0,175 et > 0,084         | 33                         | 1,15                          |
| < 0,05                     | 71                         | 2,5                           |

Cette remarque ne doit jamais être oubliée lorsqu'on étudie la salinité d'un sol : le pourcentage de sels par rapport au poids sec ne signifie rien quant à la salinité des eaux au moment de son dépôt, si l'on ne connaît pas sa teneur en eau.

1. *Salinités de quelques sédiments du Bou-Regreg.* — J'ai mesuré la salinité de quelques échantillons provenant de l'estuaire du Bou-Regreg, mais sans la rapporter à la teneur en eau :

|                                                        | NaCl % |
|--------------------------------------------------------|--------|
| Chenal de l'oued Akrech.....                           | 0,378  |
| Slikke de l'oued Akrech .....                          | 0,126  |
| Slikke de l'île (Ferme Gibert) .....                   | 1,512  |
| Slikke (Halte de Robinson) .....                       | 1,51   |
| Schorre ancien (pied de la villa d'été du Pacha) ..... | 2,52   |
| Schorre actuel (Halte de Robinson) .....               | 4,15   |

Ces échantillons n'étant pas granulométriquement semblables, il est difficile de tirer de ces mesures d'importantes conclusions. On peut toutefois remarquer que la salinité des vases de la slikke est plus élevée aux stations situées en aval de l'oued Akrech même, et que la salinité du schorre est plus forte que celle de la slikke à la station de la Halte de Robinson, ce qui est tout à fait normal, puisque le schorre n'est recouvert et imbibé que par les eaux à salinité marine aux marées de vives eaux. Si le schorre ancien est un peu moins salé, par suite de lessivage par les eaux de pluies (exondation presque constante), il n'en reste pas moins que le pourcentage est suffisant pour être une preuve de son origine fluvio-marine.

2. *Salinités des vases de l'estuaire de la Tees.* — La salinité des vases de l'estuaire de la Tees a fait l'objet d'intéressantes recherches que je vais rapidement résumer ici. Tout d'abord, il faut préciser qu'il s'agit des vases de la slikke, donc recouvertes d'eau avec chaque marée. Au lieu de faire dessécher le sédiment et d'y doser ensuite les sels, les auteurs ont préféré prélever l'eau d'imbibition de la vase pour en mesurer la salinité. Ainsi, la salinité n'est plus exprimée par rapport au poids sec du sédiment, mais en grammes pour 1.000 de l'eau d'imbibition. Cette façon de faire permet de comparer les valeurs obtenues aux valeurs de la salinité de l'eau de l'estuaire à différents moments de la marée. Le tableau suivant donne ainsi quelques résultats :

| Distance de la mer<br>en milles | Salinité<br>de l'eau d'imbibition<br>de la vase, à basse mer | Salinité<br>de l'eau d'estuaire<br>à basse mer | Salinité<br>de l'eau d'estuaire<br>à haute mer |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 6                               | 28,4                                                         | 12,6                                           | 30                                             |
| 6                               | 22,3                                                         | 14,2                                           | 30                                             |
| 10                              | 11,5                                                         | 0                                              | 25                                             |
| 11,25                           | 5                                                            | 0                                              | 21                                             |

Les auteurs ont été conduits à conclure que la salinité de l'eau retenue dans les vases est plus élevée que celle de l'eau qui les recouvre. Cette conclusion de grand intérêt est déduite des chiffres du tableau précédent, car, d'après celui-ci, il est possible de conclure à une plus grande salinité de l'eau d'imbibition que celle de l'estuaire à basse mer, et les auteurs précisent que c'est au niveau de l'eau à basse mer que la salinité de l'eau d'imbibition des vases a été mesurée.

Ces recherches, entreprises déjà, auparavant, par REID (1930-1932) sur la Tamise, ont été effectuées, sur la Tees, par ALEXANDER, BASSINDALE et SOUTHGATE (1932).

3. *Salinités des vases de la slikke de l'estuaire de la Penzé.* — En 1941, j'ai pu tenter de vérifier si les conclusions des auteurs anglais étaient exactes aussi pour d'autres estuaires, et ce sont les vases de la slikke de l'estuaire de la Penzé que j'ai étudiées à ce sujet.

En premier lieu, devant la difficulté qu'il y a à recueillir de l'eau d'inclusion d'une vase, j'ai préféré opérer différemment. Je suis parti d'un poids sec de sédiment que j'ai dispersé dans de l'eau distillée, puis mis à l'ébullition. Après refroidissement, je décante et recueille l'eau dans un ballon. De nouveau, je mets de l'eau distillée avec la prise d'essai et fais bouillir. Après refroidissement, je décante et recueille l'eau dans le ballon où se trouve déjà la première eau de lavage. Je recommence cette opération jusqu'à ce que l'eau de lavage ne trouble plus le nitrate d'argent. Si les eaux de lavage sont trop abondantes, je réduis par l'ébullition jusqu'à obtenir 100 cc. dans lesquels je dose les chlorures à l'aide d'une solution titrée de nitrate d'argent.

De cette façon, j'obtiens le pourcentage en sels par rapport au poids sec de l'échantillon. Mais, par ailleurs, quand cela m'a été possible, j'ai fait une mesure de la teneur naturelle en eau, ou à défaut une mesure de la teneur en eau sous tassement libre. Il est alors facile de rapporter la teneur en sels à l'eau d'imbibition du sédiment :

$$\frac{\text{Salinité de l'échantillon en \% (1)}}{\text{teneur naturelle en eau (T en \%)}} 1.000 = \frac{C}{T} 1.000 = S.$$

$$\frac{\text{Salinité de l'échantillon en \%}}{\text{teneur en eau sous tassement libre (T}_1 \text{ en \%)}} 1.000 = \frac{C}{T_1} 1.000 = S_1.$$

On doit, au sujet de ces deux rapports, faire la même réserve que celle qui a été faite pour les teneurs en eau :  $T_1$  a tendance à être plus fort que dans la réalité et  $S_1$  moins élevé.

Cependant,  $S$  et  $S_1$  sont comparables à la salinité des eaux de l'estuaire qui recouvrent le sédiment étudié (Sr) : j'ai établi les deux rapports :  $S/\text{Sr}$  et  $S_1/\text{Sr}$ .

Au Pont de la Corde (rive droite), la slikke est bien développée. J'ai prélevé des échantillons de vase à 4 niveaux successifs : 1° à la limite de l'eau à basse mer; 2° au niveau intermédiaire entre le bas de l'eau et la cale; 3° au niveau de la cale; 4° au niveau des maisons de la berge (haut de la cale).

Ce même jour, j'ai effectué des mesures de salinité de l'eau de l'estuaire au cours du flot. Le tableau suivant donne les résultats obtenus :

| N°          | T % | T <sub>1</sub> % | C %  | Sr, ‰ | S ‰   | S <sub>1</sub> ‰ | S/Sr | S <sub>1</sub> /Sr |
|-------------|-----|------------------|------|-------|-------|------------------|------|--------------------|
| 1 . . . . . | 143 | 185              | 4,59 | 24,5  | 32,09 | 24,80            | 1,30 | 1,01               |
| 2 . . . . . | 102 | 141              | 4,59 | 29    | 45    | 32,50            | 1,55 | 1,12               |
| 3 . . . . . | 099 | 122              | 4,59 | 33    | 46,36 | 37,60            | 1,40 | 1,14               |
| 4 . . . . . | 126 | 172              | 5,10 | 34,5  | 40,47 | 29,60            | 1,17 | 0,85               |

Il est donc facile de voir que la salinité de l'eau d'imbibition est plus élevée que celle de l'eau de recouvrement. Il est bon cependant de faire quelques réserves. En effet, par eau de recouvrement, je comprends l'eau qui est la première à recouvrir le sédiment avec la marée montante; mais il est bien évident que ce même sédiment est, par la suite (sauf naturellement le n° 4 qui est situé au niveau des hautes mers de vives eaux), surmonté par des eaux à salinité toujours croissante jusqu'à l'heure de haute mer (salinité qui, dans le cas de Penzornou en été, est marine, puisqu'elle atteint 35 ‰). On pouvait se demander

(1) Dans deux publications préliminaires (1941, 5 et 1942, 6), j'ai mis, dans ces deux rapports : « chlorures », au lieu de « salinité ». Il s'agit d'une erreur d'expression que je m'empresse de corriger ici.

s'il n'y avait pas, sinon remplacement d'une eau par une autre (ce qui semble impossible, car elle impliquerait l'idée d'une circulation continue et, par conséquent, de mise en suspension qui, dans la réalité, n'existe pas), tout au moins diffusion des sels des eaux les plus salées vers les moins salées. Cette hypothèse ne peut pas être retenue, car la salinité des eaux incluses du sédiment (S et même  $S_1$  dans une certaine mesure) est plus élevée que la salinité marine. Si donc il y avait diffusion, elle se ferait de la vase vers l'eau d'estuaire.

Dans le but d'étudier les phénomènes de diffusion qui peuvent se produire entre la vase (dont l'eau d'imbibition est salée) et l'eau douce qui peut la recouvrir, je me suis livré à l'expérience suivante : dans un cristalliseur, j'ai placé de la vase provenant de la cale de Penzornou (Penzé); je l'ai dispersée dans de l'eau de mer. Après dépôt, j'ai décanté l'eau recouvrante. J'ai ensuite recouvert avec de grandes précautions par de l'eau distillée et ai dosé les chlorures après quelques jours (la surface libre du cristalliseur étant recouverte, afin d'éviter toute évaporation) :

Diamètre du cristalliseur : 19 cm. 5.

Epaisseur de la vase imbibée d'eau de mer : 3 cm. 5 (volume = 1.000 cc.).

Hauteur de l'eau distillée recouvrante : 2 cm. 5 (volume = 750 cc.).

|                                                                     |        |
|---------------------------------------------------------------------|--------|
| Salinité de l'eau de mer (12 septembre 1941).....                   | 35,2 ‰ |
| Salinité de l'eau surmontant la vase après dispersion et dépôt..... | 36,1 » |

Eau distillée.

|                                                                                 |         |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Salinité de l'eau distillée immédiatement après avoir été placée sur la vase .. | 1,55 »  |
| » de cette même eau 10 jours après : au contact de la vase .....                | 21,67 » |
| » » » 10 » : en surface .....                                                   | 20,84 » |
| » » » 23 » : au contact de la vase .....                                        | 24,46 » |
| » » » 23 » : en surface .....                                                   | 23,61 » |
| » » » 29 » : au contact de la vase .....                                        | 24,17 » |
| » » » 29 » : en surface .....                                                   | 24,17 » |

Cette expérience montre que les sels de l'eau d'imbibition de la vase diffusent facilement dans une eau à moindre salinité, et cela beaucoup plus rapidement que les expériences de J. THOULET (1891) ne le laissent supposer.

On voit, par là, que si une vase est recouverte par une eau à moindre salinité, elle peut lui céder une partie de ses sels par diffusion. Or, ce phénomène n'est pas à négliger, car, avec l'époque de l'année (débit fluvial), la salinité des eaux recouvrantes peut changer dans de larges proportions (voir chap. III, II<sup>e</sup> partie). Il est donc possible que les vases de la slikke se chargent en sels pendant l'été (étiage) où la salure des eaux recouvrantes est élevée, puis qu'au cours de l'hiver, elles se dessalent progressivement. Il existe peut-être là un cycle intéressant que je n'ai pas encore eu malheureusement l'occasion de confirmer ou d'infirmer.

Selon PRENANT et DUVAL (1926), les sels retenus par les vases sont cédés seulement dans une très faible mesure aux eaux douces, qui en fin de jusan circulent à leur surface.

Mais il reste encore à se demander de quelle façon l'eau incluse des vases se trouve plus salée que l'eau qui les recouvre en été : on peut penser que, par suite d'une dessiccation plus ou moins poussée (suivant le niveau et donc suivant le temps d'exposition à l'air) au cours de la marée descendante, l'eau d'inclusion voit sa concentration en sels augmenter par suite d'évaporation; les eaux, qui imbibent de nouveau le sédiment avec le flot, se mélangent aux eaux résiduelles et la teneur en sels des nouvelles eaux d'imbibition augmente alors.

On peut rapprocher ces faits de ceux que plusieurs biologistes ont étudiés concer-

nant la salure des mers et cuvettes littorales. La salinité de l'eau de telles mares croît très nettement tant qu'elles sont découvertes par suite de l'évaporation (R. LEGENDRE (1923), A. DAVY DE VIRVILLE (1933, 1934), R. LAMI (1931), ou, au contraire, diminue en surface tout au moins par temps de pluie.

Au cours des quelques heures, pendant lesquelles ces cuvettes sont découvertes (le nombre exact dépend du niveau par rapport au niveau de la basse mer, et aussi du coefficient de marée), la salinité peut augmenter de 3 ‰ (M. PRENANT et M. DUVAL [1926]).

M. PRENANT et M. DUVAL ont également pu constater, à Primel (Finistère), que les algues plongées dans un courant d'eau très peu salée (marée basse) augmentent la salure de cette eau par l'eau de mer qu'elles ont retenue.

Du point de vue biologique, cette salinité élevée des eaux d'imbibition est d'une certaine importance. Selon ALEXANDER, SOUTHGATE et BASSINDALE (1932), elle pourrait expliquer la possibilité pour certaines espèces fouisseuses (Mollusques, Annélides) de supporter facilement les variations de salinité importantes au cours de la marée dans un estuaire. Ces animaux, enfouis dans la vase, à basse mer, trouveraient des conditions de vie peu différentes de celle de l'eau de mer. Dans le même sens, M. PRENANT et M. DUVAL signalent qu'au village de Penzé, où pendant plusieurs heures de la marée l'eau est douce, le crabe *Carcinus maenas* se terre dans les vases salées.

On peut donc se demander si ce n'est pas une explication générale de la présence d'espèces marines, là où les conditions physicochimiques des eaux sont différentes de celles de l'eau de mer pendant plusieurs heures au cours de la marée. L'euryhalinité de ces animaux serait donc moins réelle qu'on serait tenté de le penser au premier abord.

III. LE PH DES VASES. — Il est courant, en pédologie, de mesurer le pH d'un sol. Au premier abord, cette façon de s'exprimer est pour le moins surprenante. En effet, il ne peut être question de pH que pour une solution aqueuse. Comment peut-on dès lors parler du pH d'un matériau desséché ? La même question s'est posée pour certaines vases.

On peut procéder de deux manières : ou la teneur en eau du sédiment est suffisamment grande pour que l'on puisse en extraire une certaine quantité par filtration à la trompe, ou la teneur en eau est trop faible pour cette opération, et il faut, dans ce cas, humidifier le sédiment dans une large mesure et, après agitation et contact intime, extraire l'eau par filtration. L'eau dont on se sert à cet usage est de l'eau distillée.

En possession de cette eau, que l'on peut considérer, avec des réserves, comme étant l'eau d'imbibition, il s'agit de mesurer son pH soit par une méthode colorimétrique, soit par une méthode électrique. On peut encore, si l'échantillon possède une teneur en eau élevée, et s'il est assez homogène, mesurer directement le pH à l'aide, par exemple, de l'électrode de verre.

Les chercheurs, qui ont mesuré le pH des vases d'eau douce et plus particulièrement des vases lacustres, ont montré qu'il était généralement acide. L'acidité de ces vases est recherchée habituellement dans la présence d'acides humiques (?) et aussi dans la formation d'acide sulfurique. Mais il est possible, de toute manière, de se demander s'ils sont suffisants pour déterminer, à eux seuls, l'acidité de l'eau d'imbibition, et si l'échantillon, étant saturé d'eau à pH neutre ou légèrement alcalin, posséderait encore un pH acide.

Il faudrait, pour que les acides contenus dans la vase (les acides humiques sont très

faibles) agissent efficacement pour rendre le pH de l'eau acide, que le pH primitif de cette eau soit très éloigné de son pK (point d'inflexion de la courbe de neutralisation).

On peut donc penser que, dans la plupart des cas, ce n'est pas tant la vase qui détermine le pH de l'eau d'imbibition, mais beaucoup plus le pH primitif de cette eau. Et il se trouve justement que, dans le cas des vases d'eau douce (lacustres en particulier), le pH des eaux libres ou courantes est très souvent lui-même acide.

Il n'y a plus lieu, dès lors, de s'étonner que le pH des vases marines ou d'estuaire, imbibées par des eaux nettement alcalines, se montre à son tour alcalin, malgré la présence, dans ces vases, des mêmes acides humiques et, peut-être, du même acide sulfurique.

Voici quelques valeurs du pH mesurées dans des vases d'estuaire :

|                                                    |                 |
|----------------------------------------------------|-----------------|
| Penzé. Pont de la Corde : slikke rive droite ..... | 7,4 (colorim.). |
| » Amont du viaduc : slikke rive gauche.....        | 8,4 (colorim.). |
| » Village de Penzé : slikke rive gauche .....      | 7,7 (élect.).   |
| Loire (52). Suspension au niveau de Donges .....   | 7,2 (élect.).   |
| Bou-Regreg. Slikke, pont-route rive gauche .....   | 7,5 (élect.).   |
| » Slikke, viaduc chemin de fer rive gauche....     | 7,8 (colorim.). |

De ces quelques mesures, je ne tirerai qu'une conclusion, c'est qu'il s'agit toujours de pH alcalins. On peut toutefois noter également que le pH des vases est moins alcalin que celui des eaux qui les recouvrent. Faut-il pour cela penser que les eaux d'imbibition voient leur pH baisser par suite des acides humiques ou autres ? On pourrait supposer aussi bien que le pH baisse dans une certaine mesure, par suite du dégagement de  $\text{CO}_2$  par les êtres microscopiques qui vivent dans la vase.

Selon E. FISCHER-PIETTE (1), le pH des vases de l'estuaire de la Rance est toujours alcalin. MOORE (1930) indique aussi des pH alcalins pour les vases de la « Clyde sea area ».

Par ailleurs, ALLEE, à Wood's Hole (U. S. A.) (1923) a mesuré le pH des fonds marins de cette région et ses résultats sont les suivants :

|                                            |                |
|--------------------------------------------|----------------|
| Barres de sable .....                      | pH de 8 à 8,25 |
| Sables vaseux en surface .....             | » 8 à 8,10     |
| » » au fond .....                          | » 7,8 à 8,50   |
| Vase à Mya (vase d'estuaire)!. .....       | » 7,1 à 8,20   |
| Haute côte vaseuse à <i>Melampus</i> ..... | » 7,2 à 7,40   |

De son côté, R. LEGENDRE (1924), à Concarneau, a constaté que le pH de l'eau des fonds littoraux variait, dans d'assez larges limites, de 7,75 à 8,40. Toujours selon l'auteur : « Il n'est pas douteux que la nature mécanique du sol permet des échanges plus ou moins rapides entre l'eau interstitielle du fond et celle libre qui le surmonte. »

Dans une étude plus approfondie de cette question, il serait intéressant d'effectuer systématiquement une mesure de pH en même temps que l'on analyserait granulométriquement les sédiments, car, « pour certains animaux tout au moins, les variations d'alcalinité qui en résultent présentent, au moins, autant d'importance que la nature des sédiments ».

A. LABBÉ (1922) a, par ailleurs, constaté que le pH de l'eau des marais salants du Croisic, qui reste égal à celui de l'eau de mer dans les étiers, augmentait notablement dans les vasières (pH = 8,3 à 8,4).

(1) Renseignement oral.

Le pH des vases des estuaires et marines est donc alcalin ; il est, dans l'ensemble, assez voisin de celui de l'eau de mer ou tout au moins de celui de l'eau qui les recouvre. C'est pourquoi on est surpris par la note de A. RIVIÈRE (1942), dans laquelle on peut lire : « De nombreux auteurs ont attiré l'attention sur la richesse en fer (parfois plus de 3 %) de certaines vases marines. *L'eau qui les imprègne étant fréquemment relativement acide...* »

Les mesures de A. RIVIÈRE (1942), sont donc en contradiction avec les résultats des autres chercheurs. Sans doute s'agit-il de vases recueillies en des points très particuliers ?

IV. CONSOMMATION D'OXYGÈNE PAR LES VASES. — A l'intérieur de la vase existe une abondante microflore et microfaune qui consomme du gaz carbonique et de l'oxygène. La microflore de surface étant plus abondante que la microfaune, on pourrait supposer, *a priori*, que la consommation d'oxygène est moindre que son dégagement. Mais la vase est constituée, comme on l'a vu, par une importante fraction organique qui crée un milieu très réducteur, donc avide d'oxygène. A la surface de la vase, où de l'eau aérée circule librement, les Diatomées, qui demandent, pour pulluler, un milieu fortement oxygéné, existent en très grand nombre. Mais, en profondeur, elles se raréfient, puis disparaissent, et on ne trouve plus que des squelettes siliceux : c'est que le milieu devient de plus en plus anaérobie. Seules certaines Bactéries subsistent.

Que les vases constituent un milieu réducteur, voilà qui n'est pas nouveau et tous les chercheurs russes, allemands et français l'ont signalé depuis longtemps. C'est lui qui, entre autres, permettrait la transformation des sulfates en sulfures. C'est donc lui aussi qui, finalement, est cause de la couleur noire des vases. Plus on s'enfonce en profondeur, plus le noir est intense.

Il serait intéressant d'effectuer, suivant des coupes verticales, à différents niveaux, des mesures de rH (potentiel d'oxydo-réduction) qui renseigneraient rapidement sur les variations du milieu avec la profondeur.

A. RIVIÈRE (1942) donne, pour une vase noire provenant de Concarneau, une valeur de  $rH = 18,5$ .

L'examen des sables vaseux révèle, encore plus nettement, d'autres faits : on sait que ces derniers apparaissent jaune clair en surface et qu'en profondeur ils sont gris et même noirs : tels sont les sables à Arénicoles. Il est vraisemblable de penser qu'en surface le milieu est oxydant et réducteur en profondeur. Mais, de plus, il semble que la lumière joue un rôle important et déterminant de cette couleur. Ainsi, si on place une boîte de Pétri, contenant du sable clair de surface, à l'obscurité, au bout d'un certain temps (24 à 48 heures), il devient entièrement noir. Dans cette transformation, tout l'oxygène disponible a été consommé. En effet, l'expérience suivante, effectuée à Roscoff (1939), est démonstrative :

Quelques centimètres du sable jaune de surface, recouverts d'une couche d'eau de mer, ont été mis à l'abri de l'air (couche d'huile de paraffine) et de la lumière. Au bout de 24 heures, le sable était entièrement noirci, tandis que la teneur en oxygène dissous dans l'eau passait de 8 mgr. 95 à 0 mgr. par litre. Remis à la lumière, le sédiment est redevenu jaune superficiellement et la teneur en oxygène de l'eau était, après 24 heures, de 2 mgr. 4 par litre.

Cette expérience montre l'importance du facteur lumière et des transformations dues

à la vie végétale dans l'évolution des sables vaseux. L'oxygénation de surface peut être, semble-t-il, attribuée à la pullulation des Diatomées dont la respiration s'atténue pour finalement disparaître si l'obscurité persiste.

Des phénomènes analogues ont lieu dans le cas des vases, mais la plus grande abondance de matière organique réductrice s'oppose à une oxydation de surface aussi poussée, et c'est pourquoi la vase demeure noire, même en surface (pellicule), malgré la présence d'un grand nombre de Diatomées et autres algues inférieures.

Je me suis demandé si la vase, en présence d'eau aérée, et mise à l'abri de l'air, consommait rapidement l'oxygène dissous dans l'eau. J'ai donc expérimenté à l'aide d'un appareil imaginé par G. TEISSIER et J. MONOD (1), et qui permet d'effectuer des prélèvements d'eau dans un récipient sans introduire d'air, et d'éviter ainsi le procédé à la couche d'huile de paraffine toujours mal commode. Le récipient dont je me suis servi est un Erlenmeyer de 2.000 cc. Dans ce vase, j'ai placé 173 gr. de vase provenant de l'estuaire de la Penzé (75 gr. de produit sec et 98 gr. d'eau), et j'ai rempli le vase avec de l'eau de mer de Roscoff (S. = 35.2 ‰), puis j'ai hermétiquement fermé à l'aide d'un bouchon de caoutchouc dans lequel passaient les tubulures nécessaires aux prises d'eau. L'Erlenmeyer a été laissé à la lumière du jour au laboratoire (obscurité la nuit). Pendant un certain nombre de jours, j'ai dosé l'oxygène et mesuré le pH de l'eau recouvrant la vase. Voici les résultats obtenus :

| Jours et heures d'observation | pH   | Oxygène<br>en mgr.-l. |
|-------------------------------|------|-----------------------|
| 11-7-42, à 19 heures.....     | 7,4  | 6,88                  |
| 12-7-42, à 19 » .....         | 7,1  | 2,43                  |
| 13-7-42, à 10 » .....         | 7,15 | 0,97                  |
| 13-7-42, à 19 » .....         | 7    | 0,32                  |
| 14-7-42, à 11 » .....         | 6,3  | 1,50                  |
| 14-7-42, à 19 » .....         | 7    | 1,62                  |
| 15-7-42, à 19 » .....         | 7    | 1,50                  |
| 16-7-42, à 11 » .....         | 7    | 1,62                  |
| 16-7-42, à 19 » .....         | 6,8  | 1,30                  |
| 17-7-42, à 19 » .....         | 7    | 1,30                  |

Un incident matériel ne m'a pas permis de continuer l'expérience plus longtemps.

D'après ces résultats, on peut déjà noter que la vase consomme de l'oxygène au début très rapidement, puisque, le troisième jour d'expérience, la teneur s'abaisse à 0,32. Comme la quantité d'eau surmontant la vase au départ était d'un peu moins de 2.000 cc., cela faisait environ 13 mgr. 5 d'oxygène dissous dans l'eau. Au bout de trois jours, la teneur en oxygène n'est plus que de 0,32 (soit environ 0,6 pour la quantité d'eau surmontant la vase). Il est donc facile de déduire qu'en 72 heures, 75 gr. de vase (poids sec) ont consommé environ 13 mgr. d'oxygène. Ceci tiendrait à montrer que la vie microbienne est intense. Mais, à partir de ce moment, la teneur en oxygène se met à croître pour atteindre 1,62 le lendemain. Il est possible, et même vraisemblable, qu'une grande partie de la vie primitive doit s'éteindre par défaut d'oxygène et que les algues microscopiques qui subsistent seules produisent de l'oxygène. Cette teneur demeure à peu près constante pendant les jours suivants et tant que l'expérience se poursuit. Que se passe-t-il par la suite ? La teneur en oxygène devient-elle nulle et la vase reste-t-elle seulement le siège d'activités de Bactéries anaérobies ? C'est très probable.

(1) Je ne donne pas ici la description de ce dispositif qui doit, depuis longtemps déjà faire l'objet d'une note de ses inventeurs, mais je les remercie de m'avoir autorisé à l'utiliser.

J'espère un jour, avoir l'occasion de poursuivre plus loin ces recherches. J'en profiterai d'ailleurs, à ce moment, pour mettre un autre Erlenmeyer en essai à l'obscurité permanente, et un autre à l'éclairement permanent du jour. Le facteur lumière, dont le rôle n'apparaît pas ici nettement, pourra peut-être être décelé de cette manière.

Le pH (mesuré électriquement à l'électrode de verre) diminue de 3/10 d'unité en liaison avec la diminution de teneur en oxygène (dégagement de  $\text{CO}_2$ ), puis il diminue encore jusqu'à 6,3, valeur minimum, observée avec un retard de plus de 12 heures sur la teneur minimum en oxygène. Après quoi, tandis que la teneur en oxygène se stabilise aux environs de 1,5, le pH se stabilise aussi aux environs de 7. Des mesures de  $\text{CO}_2$  dissous auraient sans doute rendu compte de ces variations de pH.

Une autre expérience, conduite dans un but différent, m'a montré un phénomène analogue : de la vase de la Penzé était placée dans un cristallisateur et recouverte d'eau de mer. L'ensemble n'était pas à l'abri de l'air (ou seulement très imparfaitement, par une feuille de carton). La teneur en oxygène de l'eau était égale au départ à 8 mgr.-l. et, trois semaines après, elle n'était plus que de 5,5 mgr.-l.

En résumé, il semble que l'on puisse affirmer, sans se tromper : 1° que la vase constitue un milieu essentiellement réducteur, 2° qu'en y comprenant la vie qui l'habite, elle est consommatrice d'oxygène. Cette consommation d'oxygène est imputable, en partie aussi je pense, à l'existence de larves, qui, au même titre que les Diatomées et les Bactéries, font partie de l'ensemble hétérogène qu'est la vase.

Des recherches, dans un sens voisin, ont été effectuées par WAKSMAN et ses collaborateurs et par H. R. SEIWELL (1937) sur l'eau de mer : l'auteur, qui mesurait la teneur en oxygène de l'eau de mer *in situ*, constatait au laboratoire qu'un échantillon de cette eau consommait une certaine quantité d'oxygène, qui variait avec le temps et avec la température. Il a ainsi pu constater que 1.000 cc. d'eau de mer consommaient par jour 0,0385 cc. d'oxygène. La consommation d'oxygène par l'eau de mer est imputée surtout aux interventions bactériennes.

## 5. — Les propriétés physiques des vases.

Il n'est pas dans mon intention de développer ici ce chapitre. Je n'ai pour ainsi dire fait aucune recherche dans ce sens. VSEVOLOD ROMANOSKY poursuit, par contre, d'importants travaux sur ces propriétés. Je rappellerai seulement ce que JACQUES BOURCART et moi-même (1942) avons déjà mentionné à la suite d'un certain nombre d'observations de J. BOURCART et de V. ROMANOVSKY (1941, 1943).

Les propriétés d'ensemble des vases sont en grande partie celles des solides : continuité d'aspect, cohésion, rigidité et enfin plasticité.

1. *Cohésion et plasticité.* — Par suite de sa teneur en eau, la vase possède une certaine cohésion. Celle-ci provient de l'adhésion des grains, ou particules, entre eux par la pellicule d'eau qui les revêt. Elle est d'autant plus forte que, d'une part, cette pellicule est plus mince et que la surface spécifique (qui augmente avec la finesse des grains) est plus grande. Si la quantité d'eau liée augmente dans de trop grandes proportions, on atteint une certaine limite (limite de liquidité d'Atterberg) et la cohésion diminue car on a affaire à une suspension. La limite à partir

de laquelle apparaît la cohésion s'appelle (selon Atterberg) la limite de plasticité que l'on exprime par une certaine teneur en eau. Entre ces deux limites, la vase est plastique, c'est-à-dire qu'il peut y avoir déformation de l'ensemble, sans retour élastique et sans rupture de continuité.

2. *Rigidité et thixotropie*. — Il n'y a pas de viscosité mesurable de la vase. De la vase est placée dans une cuve horizontale, celle-ci est inclinée d'un certain angle, la surface libre ne redevient jamais horizontale. Si la vase était visqueuse, l'horizontalité serait atteinte au bout d'un certains temps (mesure de la viscosité, *in* DUCLAUX, 1934). Cette expérience montre par contre qu'elle est rigide. La rigidité peut se mesurer à l'aide d'un appareil imaginé par J. BOURCART, J. FLORENTIN et V. ROMANOVSKY (1941), réalisé par ce dernier, et dont la description ne saurait trouver place ici. Il suffit de savoir que la rigidité s'exprime en dynes par centimètre carré; la valeur mesurée est la force de cisaillement déterminant la rupture des liaisons assurant la rigidité de l'ensemble.

Si on secoue l'ensemble rigide qu'est la vase, il se liquéfie immédiatement. L'ensemble redevient solide au bout d'un certain temps après que l'agitation a cessé.

Ce phénomène, connu depuis longtemps, a été appelé, par FREUNDLICH, thixotropie. Les sédiments (tangues) de la baie du Mont Saint-Michel sont thixotropiques (J. DUCLAUX [1934]); les argiles smectiques (bentonites) le sont également.

3. *Compressibilité, élasticité*. — L'œdomètre de TERZAGHI (1925) est un appareil permettant de mesurer la compressibilité des argiles; il a été utilisé pour étudier celle des vases. La compression à l'œdomètre fait disparaître la totalité de l'eau incluse, ce qui montre que la vase n'est pas élastique (comme l'est dans une certaine mesure l'argile qui réabsorbe l'eau quand la pression cesse de se faire sentir).

4. *Perméabilité*. — Un appareil imaginé par P. URBAIN (1941) et modifié par V. ROMANOVSKY (1943), a permis à ce dernier de mesurer, suivant la formule de DARCY, la perméabilité des vases. Les vases de l'estuaire de la Penzé qui ont été étudiées se sont montrées pratiquement imperméables sous des charges faibles.

En résumé, les vases se rapprochent des argiles par quelques-unes de leurs propriétés physiques, mais en diffèrent cependant par un certain nombre d'autres.

5. *Hypothèses sur la structure de la vase*. — Certaines des propriétés physiques de la vase, comme la rigidité et la thixotropie, ne peuvent s'expliquer correctement qu'en supposant qu'elle possède une véritable structure, c'est-à-dire un arrangement des particules en un réseau de mailles. Dès lors, la rigidité de la vase peut s'exprimer comme étant la force qui s'oppose à la rupture de cette structure.

Par ailleurs, J. BOURCART (1939), puis B. RAJČEVIĆ (1939), ont remarqué, au microscope, que la vase présentait une structure en réseau à mailles hexagonales, structure qui pourrait dériver de celles des flocons avant leur sédimentation.

Tout permet donc de croire que la vase possède une structure; mais, pour le moment, on n'en est qu'au stade des hypothèses sur sa forme même.

## 6. — Biologie et microbiologie des vases.

Les vases constituent un étonnant milieu biologique qui, dans l'ensemble, est assez bien connu.

I. FAUNE ET FLORE MACROSCOPIQUES. — La faune et la flore macroscopiques vivant sur ou dans les vases d'estuaire, sont en réalité assez pauvres. En se rapportant aux recherches des biologistes (P. M. de BEAUCHAMP [1914], M. PRENANT et G. TEISSIER [1925], TH. MONOD [1926], E. FISCHER-PIETTE [1929], A. DAVY DE VIRVILLE [1938, 1943], R. LAMI [1931, 1933, 1941]; les biologistes qui ont étudié la Tees (1931-1935) : ALLEN et

TODD [1900, 1902], LLYOD [1930, 1931], etc...), on peut dresser la liste suivante qui représente les espèces les plus fréquentes, mais qui, pour un estuaire donné, est naturellement très incomplète.

A. *Animaux vivants enfouis dans la vase* (vase sableuse ou sable vaseux). — Annélides polychètes : *Nereis diversicolor*, *Nephtys Hombergi*; Mollusques lamellibranches : *Scrobicularia piperata*, *Mya arenaria*. Ces deux espèces sont très fréquentes et constituent la macrofaune la plus caractéristique des vases des estuaires. Mais on peut ajouter, surtout dans la partie à influence maritime dominante : *Cardium edule*, *Ostrea*. Il existe notamment dans la Penzé, enfoui à faible profondeur dans la slikke rive gauche, au niveau de Toull Houarn, un banc de *Cardium* où les individus sont innombrables. Les *Ostrea* vivent à la surface de la basse slikke et se draguent souvent aussi dans les chenaux.

Crustacé isopode : TH. MONOD signale, dans son travail sur la Basse-Seulle, que la zone moyenne du talus qui sépare le schorre de la slikke est l'habitat typique de l'isopode : *Paragnathia formica*. Je ne sais si d'autres auteurs l'ont signalé.

Crustacé décapode : *Carcinus maenas*; ce crabe, commun dans tous les estuaires, vit à basse mer enfoui dans la vase dans laquelle il se creuse des terriers (TH. MONOD, M. PRENANT et M. DUVAL).

Il est curieux de noter que les slikkes de l'estuaire du Bou-Regreg, en amont du Pont du chemin de fer, sont peuplées par une quantité fantastique d'un crabe, *Uca Tangeri*, qui creuse des terriers dans la vase.

Il est évident que ces espèces, qui sont d'origine marine et qui vivent en milieu plus ou moins dessalé, ne se trouvent pas dans les vases qui se déposent dans la zone strictement d'eau douce des estuaires. Mais comme on l'a dit, en ce qui concerne les petits estuaires bretons, cette zone est inexistante la plupart du temps. De sorte que ces animaux, enfouis dans la vase dont l'eau d'imbibition est salée, vivent dans un milieu qui ne varie pas tellement au cours de la marée, et l'eau douce qui peut couler dans le chenal à basse mer n'a pas d'influence sur eux.

On a signalé, à plusieurs reprises, l'existence d'Insectes Collemboles vivant à la limite du schorre et de la slikke (talus).

B. *Animaux vivant à la surface de la vase*. — La macrofaune vivant à la surface de la vase est presque inexistante. La faune fixée ne trouve pas dans la vase de support convenable, mais les pointements rocheux qui parfois émergent de la vase sont habités par une faune marine de Gastéropodes dont le nombre d'espèces est d'ailleurs très restreint. Mais il est peut-être intéressant à ce sujet de noter les observations de E. FISCHER-PIETTE (1941) sur les Patelles (*Patella vulgata*) : « Au voisinage de la vase, leur croissance linéaire est jusqu'à 13 fois plus rapide, leur croissance volumétrique 22 fois plus rapide que dans les stations dépourvues de vase; en compensation, leur existence est 5 ou 6 fois plus courte, de sorte qu'elles n'atteignent que le double de la taille normale. On peut dire qu'au voisinage de la vase, l'existence des Patelles est comparable à un feu de paille. » La limite amont à laquelle on rencontre des Patelles n'est naturellement jamais très éloignée de l'embouchure.

Sur les rochers pointant hors de la vase et dans les zones pas trop dessalées, se trouvent quelquefois en très grande abondance la moule : *Mytilus edulis* dans les estuaires bretons, et *Mytilus gallo-provincialis* aux rochers des Oudañas, dans l'estuaire du Bou-Regreg.

On peut citer également, bien qu'il ne se rencontre pas dans tous les estuaires, le Serpulien : *Mercierella enigmatica* F. (canal de Caen à la mer, Rance, Tamise). Naturellement, le substratum choisi par cet animal n'est pas, à proprement parler, la vase; mais les pierres, les rochers, les pieux, les murs qui s'y trouvent. Cette espèce peut vivre baignée par des eaux dont la salinité varie brusquement et dans une large mesure.

Il ne faut pas oublier, non plus, que bon nombre de Crustacés décapodes nageurs (Crevettes) vivent dans les eaux saumâtres des estuaires et que, vraisemblablement, ils trouvent dans la pellicule de surface de la vase une excellente nourriture : *Palæmonetes varians*, et aussi parfois, en très grande abondance, *Crangon vulgaris*, sans oublier les Hysidés.

L. FAGE, à la suite d'une communication de J. BOURCART (1942), a indiqué le rôle important que joue la pellicule vivante qui tapisse en surface les fonds sous-marins au point de vue de l'alimentation des animaux benthiques « mangeurs de vase ». Il rappelle à ce sujet les travaux de J. HJORT (1938) sur la relation entre la teneur en matière organique des vases et l'abondance de *Pandalus borealis* dans les eaux froides norvégiennes et du Golfe du Maine, et ceux commencés par M<sup>lle</sup> R. LUX, sur les vases littorales de Monaco et de Concarneau.

c. *Flore fixée ou liée à la vase.* — Dans les estuaires, la flore algologique marine persiste assez bien vers l'amont; elle n'est pas fixée à la vase, mais aux roches qui y existent; on rencontre ainsi : *Fucus vesiculosus*, *F. serratus*, *F. ceranoïdes* (qui supporte les plus faibles salinités), *Pelvetia canaliculata*, etc...

A. DAVY DE VIRVILLE (1943) croit avoir remarqué que le *Fucus ceranoïdes* ne se rencontre que dans les estuaires où l'amplitude de la variation de salinité est élevée, ou, plus justement, à certaines époques de l'année coule de l'eau très faiblement salée (sinon douce) : estuaire de l'Aulne, estuaire de la Penzé; son absence dans celui de la Rance s'expliquerait de cette manière.

Sur la vase elle-même, les Algues brunes sont plus rares, mais on trouve fréquemment des Chlorophycées : *Enteromorpha compressa*, *E. intestinalis*, et parfois aussi *Ulva lactuca*. Mais ce qui, du point de vue algologique, est le plus curieux, est la présence, en certaines stations du littoral de la Manche et de l'Atlantique, du *Fucus lutarius* vivant sur la vase. Il a fait l'objet de très intéressantes observations de la part de E. CHEMIN, A. DAVY DE VIRVILLE (1943) et de R. LAMI (1931) : il a été trouvé en très grande abondance dans les bancs de vase des îles Chausey et aussi, ce qui est à noter, sur la vase de la slikke dans l'estuaire de l'Aulne, au niveau de Terenez. A. DAVY DE VIRVILLE pense que sa localisation, très spéciale, mais toujours spécifiquement vaseuse, est liée à la physicochimie de la vase. Les circonstances actuelles nous empêchent, l'auteur et moi, de commencer des recherches dans ce sens.

Parmi les phanérogames qui peuplent la vase sableuse, il faut citer souvent des Zostères (*Zostera marina* et *Zostera nana*) qui, dans certains cas, mais toujours là où le milieu est encore nettement marin, forment de vastes prairies.

La slikke de la vase est souvent habitée par des *Spartina*. Cette plante, dont l'origine est américaine, colonise peu à peu les slikkes des estuaires du littoral de la Manche et de l'Atlantique. Les deux espèces les plus fréquentes sont *Spartina Townsendii* et *Spartina stricta* (cette dernière, dont l'aire d'extension géographique est plus vaste, se rencontre aussi dans l'estuaire du Bou-Régret). Plusieurs auteurs (OLIVER [1920, 1928]) ont souligné leur intérêt, et OLIVER pense que la *Spartina* joue un rôle non négligeable dans l'accumulation des dépôts de vase et de leur exondation, et par conséquent de la transformation possible de la slikke en schorre. Ce problème de la *Spartina* est étudié en France par J. JACQUET qui y a apporté des précisions intéressantes. La *Spartina* ne remonte pas très loin en amont dans les estuaires.

Dans les zones amont (où pourtant l'eau est encore saumâtre, comme dans l'Aulne), on trouve des plantations de roseaux (*Phragmites*) qui s'avancent et poussent dans la slikke vaseuse. Il semble qu'eux aussi doivent jouer un certain rôle dans l'accroissement des bancs de vase.

Enfin, il faut signaler l'importance extraordinaire de la Mangrove dans les zones vaseuses fluvio-marines des régions tropicales. La mangrove, qui vit en pleine vase (poto-poto de la côte de Guinée), est une association de diverses espèces plus ou moins amphibies où prédominent les palétuviers.

II. FAUNE ET FLORE MICROSCOPIQUES. — La faune et la flore microscopiques sont abondantes dans les vases, tant au point de vue du nombre d'individus de chaque espèce que du nombre d'espèces.

La microfaune et la microflore se trouvent dans la vase, ou mortes ou vivantes. Les espèces mortes conservées sont celles dont le squelette ou le test, siliceux ou calcaire, demeure : on les retrouve donc dans la vase de profondeur. Par contre, les espèces vivantes, qui pour la plu-

part demandent, pour subsister, un milieu aérobie, ne se trouvent qu'en surface et le plus souvent à l'extrême surface (pellicule).

L'origine même de cette vie est double : le plus grand nombre d'espèces est d'origine planctonique et ne se trouve dans la vase ou sur la vase que par suite de sédimentation à marée descendante; les autres sont essentiellement des Bactéries dont le milieu d'élection est bien la vase.

Parmi les espèces planctoniques, on peut citer un grand nombre de Diatomées qui sont caractérisées par les spécialistes par la coexistence d'espèces marines, d'eau douce et saumâtres. et un certain nombre d'entre elles vivent en enduit sur la vase : *Navicula*, *Nitzschia*, *Biddulphia*, *Pleurosigma*, *Coscinodiscus*, etc... Ce sont les Diatomées qui dominent de beaucoup le reste de la vie microscopique non bactérienne. Elles sont vivantes à la surface de la vase et contribuent à lui donner un aspect pelliculaire jaunâtre. Il est particulièrement remarquable de noter l'abondance de Diatomées dans les petites flaques d'eau qui subsistent parfois à la surface de la slikke. Cette microflore meurt quand les conditions aérobies disparaissent et on ne trouve plus que les squelettes siliceux dans les vases profondes. Il n'en reste pas moins vrai que l'association de certaines espèces de Diatomées peut être considérée comme un élément caractéristique des vases fossiles.

Cette très grande abondance de Diatomées avait déjà été signalée par PESTEL, puis ERHENBERG, dans les vases littorales de la mer du Nord (*in* K. ANDRÉE [1920]) dont elles pourraient constituer plus du 1/10<sup>e</sup> du volume.

On sait que la flore diatomologique planctonique marine varie avec la saison; il serait très intéressant d'effectuer des recherches dans ce sens en ce qui concerne les Diatomées des vases. On en tirerait peut-être d'utiles renseignements sur les vitesses de sédimentation.

A côté des Diatomées se rencontrent, en assez grande quantité, des Cyanophycées qui, dans certains cas, peuvent aussi constituer des enduits à la surface de la slikke. On peut encore citer, dans la microflore, quelques Silicoflagellés et Phéoflagellés (Chrysomonadines), comme le genre *Coccolithophora* (à coque calcaire faite de plaquettes indépendantes) et des Péridiniens. Dans la vase profonde, on retrouve (caractéristique microscopique de la vase) les coccolithes = plaques calcaires. Enfin, de très nombreuses Bactéries, au sujet desquelles il n'est possible de revenir ici.

La microfaune d'origine planctonique se compose surtout d'Infusoires, de larves d'Annélides ou de Mollusques (Trochophores), de Némathodes, qui vivent essentiellement collés à la surface de la slikke, mais qu'on ne trouve pas en profondeur. Par contre, subsistent des Foraminifères dont le squelette calcaire est résistant. P. MARIE (1938) a étudié notamment les Foraminifères des vases de l'estuaire de la Rance. Ses conclusions méritent d'être notées : les Foraminifères vivants subsistent émergés, entre deux marées, par suite de la teneur en eau des vases; tantôt les espèces rencontrées sont caractéristiques des eaux saumâtres, tantôt au contraire, d'autres, comme *Globigerina bulloides*, connu pour être pélagique, s'adaptent à des eaux de salinité très variable; enfin d'autres, comme *Rotalia Beccarii*, connue pour être caractéristique des eaux saumâtres, n'atteignent leur maximum de développement que lorsque la salinité est normale (marine).

Son étude montre que la plupart des Foraminifères calcaires, généralement considérés comme ne vivant que dans les eaux marines, sont capables de s'adapter à des eaux de salinité très variable et même parfois à des eaux à peu près douces.

Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas d'animal vivant, mais d'une fraction squelettique, il est très fréquent de trouver dans la vase des spicules d'Eponges siliceuses et parfois calcaires, à quoi on peut ajouter des débris de Bryozoaires, des fragments de piquants et de tests d'Ourins, etc. Tout ceci faisant partie du plancton d'estuaire d'origine marine.

Les coquilles de mollusques marins, autres que ceux qui ont été cités, peuvent parfois se rencontrer dans les vases proches de l'embouchure : ce sont alors des squelettes d'animaux ne vivant pas *in situ* et amenés soit par le vent (?), soit surtout par des marées de tempêtes. De même il arrive, lorsque le bassin versant comprend des formations sédimentaires anciennes (comme la craie de la vallée de la Seine, les calcaires et les marnes tertiaires de la vallée du Bou-Regreg), que des restes d'une flore et d'une faune microscopiques soient amenés à l'estuaire en

flottaison (teneur en suspensions) et soient déposés à la surface de la vase par sédimentation. Le diagnostic de la microfaune et microflore doit donc séparer les squelettes des espèces actuelles de ceux des espèces plus anciennes. Ce point est des plus importants pour le géologue. Les biologistes, eux, auront toujours recours à l'examen de la faune vivante et aucune confusion n'est alors possible.

De ce bref aperçu, il semble ressortir que la faune et la flore des vases de la slikke des estuaires sont à caractère nettement maritime, avec parfois des adaptations à des dessalures progressives. Le caractère inverse (dulçaquicole) n'apparaît, par contre, que très rarement.

#### CHAPITRE IV. — RÉPARTITION ET EXTENSION GÉOGRAPHIQUE ACTUELLE DES SÉDIMENTS FLUVIO-MARINS

Il est nécessaire de connaître d'une façon aussi exacte que possible la répartition des sédiments fluvio-marins dans les estuaires, de manière à pouvoir par la suite définir des facies. Cette répartition a été donnée fragmentairement au cours des pages précédentes. On peut la schématiser ainsi :

Dans les estuaires, la formation sédimentaire qui se dépose le plus fréquemment est ce que l'on a appelé la vase. Cette vase, suffisamment caractérisée, est plus ou moins sableuse. Dans les estuaires bretons et dans celui du Bou-Regreg, en amont de la Tour Hassan, c'est elle qui envahit tout le lit, de telle sorte qu'à marée basse, un estuaire comme la Penzé, entre le Pont de la Corde et le village de Penzé, apparaît comme un fleuve de vase; le chenal passe alors inaperçu. Mais qu'il s'agisse de l'Aulne, de l'Elorn, de l'Odet ou du Trieux, l'aspect des bancs de vase est identique. Les descriptions concernant les estuaires anglais sont analogues. Donc, c'est un fait d'ordre très général que les estuaires de petites rivières (à faible débit fluvial) sont caractérisés par le très grand développement des bancs de vase.

Ces bancs constituent ce que l'on a nommé, au début de ce travail, la slikke, c'est-à-dire la zone des dépôts découvrant entre la haute mer et la basse mer. L'accroissement progressif de la slikke se fait par colmatage des rives qu'elle constitue. Donc, premier point à retenir comme étant très général : la slikke est constituée par de la vase formant les rives naturelles des estuaires de type breton. Cette vase apparaît parfois assez hétérogène par suite de l'existence de fins graviers provenant de la désagrégation des versants locaux.

Dans la partie ne découvrant pas à basse mer (autrement dit dans le chenal), de ces estuaires, que trouve-t-on comme sédiment ? parfois du sable assez pur, quelquefois du sable coquillier (ou du sable à Lithotammiées, moerl), la plupart du temps mêlé à de la vase. Je dis bien mêlé, car il n'entre pas dans la constitution intime de la vase, ce n'est qu'un apport secondaire. Très souvent aussi, notamment dans la zone amont de l'estuaire, lorsqu'il se rétrécit notablement, le chenal est occupé par de la vase; les deux slikkes se rejoignent : c'est le cas dans l'estuaire de la Penzé en amont du viaduc du chemin de fer, et dans celui du Bou-Regreg en amont de la Halte de Robinson.

Cette note dominante de vase des estuaires bretons n'est plus tout à fait exacte quand il s'agit des estuaires type Seine, Loire, Gironde. Certes, ces estuaires sont encore différents les uns des autres par bien des points; mais, dans l'ensemble, si le long des rives on retrouve encore de la vase (Seine, entre Tancarville et le Havre; Loire, entre Donges

et Saint-Nazaire), on y trouve parfois aussi des sables. Et les sables deviennent surtout abondants et caractéristiques dans le chenal où ils forment des bancs plus ou moins mobiles qui entravent la navigation. Les coupes transversales de l'estuaire de la Loire (fig. 9) indiquent bien l'existence de ces bancs de sable qui subdivisent le chenal en plusieurs bras.

Ainsi, dans l'estuaire de la Loire, on recueille du sable dans le chenal, entre Nantes et Saint-Nazaire, et naturellement au delà.

Dans le Bou-Regreg, on a vu que les bancs de sable étaient limités à l'embouchure (avant-port de Rabat).

De tout ceci, il y a lieu de retenir : que dans les estuaires, — type breton, — la vase est le sédiment dominant; sa répartition est générale et le chenal est très souvent envasé; les sables — localisés dans le chenal — sont excessivement rares; et que, dans les estuaires de proportions plus larges, à vastes bassins versants, — type Seine-Loire, — la vase existe, mais que le sable est également très abondant et domine dans les chenaux, notamment dans la zone aval des estuaires.

La vase typique, qui constitue la slikke d'un estuaire, se retrouve très souvent le long du littoral marin proche de l'estuaire considéré. C'est ainsi que, par exemple, on trouve de la vase le long de la côte de Guinée, dans la zone comprise entre la Gambie et la Sierra Leone. Cette vase est, sans aucun doute possible, fluvio-marine. Son analogie avec celle des estuaires bretons est frappante. Mais ceci est normal, car la côte d'Afrique occidentale est, dans cette région, une reproduction de la côte hercynienne française (Vendée, Bretagne, Normandie) : les estuaires ont l'aspect de rias bretons. La marée d'amplitude, assez faible en général le long de la côte d'Afrique, prend exceptionnellement, en Guinée, une amplitude allant jusqu'à 5 m., ce qui explique le développement particulier des bancs de vase dans cette région où, par suite de la mangrove, ils prennent des aspects très particuliers. Aspects qu'ils partagent d'ailleurs avec bien des côtes tropicales vaseuses : Californie, Floride, Guyane, Australie, Tasmanie (P. H. FISCHER : Zone néritique, 1940).

Partout où il y a estuaire à marées, il y a vase. C'est un phénomène tout à fait généralisé. Faut-il rappeler la côte marocaine qui n'est envasée que dans la partie appartenant à la Meseta, où les cours d'eau se terminent par des estuaires (O. Bou-Regreg, O. Cherrat...); la côte portugaise, avec les estuaires du Tage, du Sado; la côte de Galice espagnole; la côte française : estuaires de l'Adour, Gironde, Seudre, Charente, Loire, Vilaine, Scorff, Odet, Aulne, Elorn, Penzé, Trieux, Rance, Orne, Seine, Somme, et j'en passe, car, à partir de la Gironde, toutes les embouchures des fleuves, grands ou petits, sont des estuaires plus ou moins envasés. Mais c'est sans doute la côte charentaise et vendéenne-où les vases littorales d'origine fluvio-marines sont le plus largement réparties.

Il est vraisemblable de penser que la grande traînée vaseuse sur le plateau continental, indiquée sur les cartes marines depuis la carte de DELESSE (1871), comprise entre l'embouchure de la Gironde et le Sud de la Pointe de Penmarch, est une accumulation de sédiments fluvio-marins d'origine non seulement girondine, mais due aux apports de tous les fleuves côtiers de cette région du littoral français.

Estuaires et vases se retrouvent encore en Angleterre, en Ecosse, en Irlande; les embouchures de tous les fleuves de la Mer du Nord sont des estuaires envasés.

Estuaires et vases encore dans la Mer Noire. Estuaires et vases le long de la côte sibérienne, dans l'Océan Glacial Arctique et dans le Pacifique Nord (V. BRAJNIKOV [1904], V. N. LABEDEFI [1911]).

Estuaires et vases tout le long de la côte canadienne et américaine de l'Atlantique Nord; et toujours le même caractère avec les embouchures des fleuves de l'Amérique du Sud, etc...

Ainsi l'estuaire apparaît comme la forme la plus générale de la terminaison des fleuves. Les plus grands ports mondiaux sont situés à des kilomètres en amont dans les estuaires, justement parce que tout en étant à l'abri des vagues, tout en étant plus proches de « l'arrière-pays », les bateaux jouissent du phénomène de la marée. A cette marée se trouve lié un sédiment caractéristique : la vase. On le retrouve partout où il y a un estuaire, et très souvent son extension géographique déborde largement la zone proprement fluvio-marine pour aller constituer des dépôts marins littoraux.

#### Résumé relatif aux sédiments fluvio-marins.

Dans les pages précédentes, ont successivement été examinés et étudiés :

1. — La distinction qu'il y a à faire entre les sédiments monodispersés et polydispersés ; les sédiments naturels, marins, fluviaux et fluvio-marins sont pratiquement toujours polydispersés.

2. — Le terme de phase, en ce qui concerne un sédiment, concerne les éléments compris entre deux limites dimensionnelles et jouissant, entre ces deux limites, de propriétés physiques spécifiques.

Dans ces conditions, les sédiments monophasés les plus fréquents sont les sables, dont les éléments sont compris entre 2 mm. et 0 mm. 02 (J. BOURCART).

3. — Les sables sont abondants dans les estuaires, mais principalement dans les chenaux. L'étude de ceux de l'embouchure du Bou-Regreg, par l'analyse granulométrique, a montré qu'ils étaient, en réalité, la somme, en proportions diverses, d'un apport marin et d'un apport fluvial. L'exemple du Bou-Regreg semble assez général et il est vraisemblable de penser que la courbe granulométrique à deux maxima peut être considérée comme une caractéristique des sables d'estuaire.

Mais l'étude des sables, et notamment la détermination rigoureuse de leur origine, ne pourra être faite sûrement que par la conjugaison de plusieurs méthodes d'analyse : analyse granulométrique, analyse minéralogique (spectre de minéraux lourds) et analyse morphoscopique (selon la technique de A. CAILLEUX).

4. — Les sédiments les plus généralement répandus dans les estuaires sont polyphasés et le type en est la vase.

5. — La définition de la vase — qui ne doit pas être confondue avec les argiles, les limons et les boues océaniques — : sédiment constitué par une phase sableuse, une phase pulvérulente, une phase colloïdale.

6. — L'aspect macroscopique de la vase constituant les dépôts de la slikke : sédiment noirâtre, à forte teneur en eau, d'aspect brillant, thixotropique, sans odeur, plastique.

7. — L'étude détaillée de la vase. Elle peut être considérée, en employant le langage des physicochimistes, comme un système hétérogène comprenant essentiellement un milieu liquide et un milieu solide.

8. — Le milieu liquide. C'est de l'eau : eau de mer, eau saumâtre, eau douce dont la proportion par rapport au poids sec est très variable, mais semble être liée à la plus ou moins grande proportion de colloïdes. L'ordre de grandeur de la teneur en eau des vases par rapport au poids sec est d'environ 100 %.

9. — Le milieu solide se compose de sables, poudres, colloïdes en proportions variables, mais presque toujours la fraction  $< 0,05$  est supérieure à 50 %. D'un autre point de vue, on peut distinguer, selon les termes de B. BRAJNIKOV : 1° une partie inerte, inorganique : quartz et autres minéraux (c'est le quartz qui domine statistiquement, sauf dans le cas où le bassin versant fournit une poudre calcaire, comme c'est le cas pour la Seine); — 2° une partie active, principalement constituée par de la matière organique (8 % en moyenne) transformée en partie en humus par l'action de Bactéries, et de fer (3 % en moyenne) sous forme de sulfure (en profondeur) ou d'hydroxyde (en surface).

Fer et surtout matière organique sont à l'état de gels colloïdaux imprégnés d'eau et, de ce fait, le volume qu'ils occupent est très grand : ils forment le liant (ciment) des vases.

10. — L'origine de la matière organique est multiple : débris d'algues, cadavres de mollusques marins, sécrétions de ces mollusques (mucus), et surtout chute et sédimentation du plancton. L'étude du rapport C/N dans les vases fluvio-marines montre qu'il est souvent voisin de celui des vases marines et que l'apport végétal doit l'emporter sur l'apport animal.

11. — L'origine du fer dans les vases est sans doute triple : détritique, chimique et biochimique (Ferro bactéries).

12. — La vase est un ensemble, certes hétérogène dans le détail, mais qui, du point de vue de ses propriétés physiques et de ses échanges avec le milieu extérieur, constitue un ensemble.

13. — Les échanges et interactions des vases avec le milieu extérieur :

La salinité des vases (c'est-à-dire en réalité la salinité des eaux d'imbibition) est en général plus élevée que celle des eaux recouvrantes.

Le pH des vases (c'est-à-dire de la suspension aqueuse que constitue le milieu solide dans le milieu liquide) est en général alcalin, mais moins alcalin que les eaux recouvrantes.

Les vases consomment de l'oxygène : à l'abri de la lumière et de l'air, les algues unicellulaires comme les Diatomées ne produisent plus d'oxygène et les vases appauvrissent rapidement les eaux avec lesquelles elles sont en contact.

14. — Les propriétés physiques des vases : elles sont cohérentes et plastiques, rigides et thixotropiques, compressibles et non élastiques, pratiquement imperméables. Tout permet de croire que les vases possèdent une structure interne et l'arrangement de leurs éléments en un réseau.

15. — La biologie et la microbiologie des vases : la faune et la flore macroscopiques vivant dans les vases ou à leur surface sont pauvres. Il faut citer, parmi les espèces les plus caractéristiques : *Mya arenaria*, *Scrobicularia piperata*, *Fucus lutarius*, *Enteromorpha* et parfois *Zostera* (sables vaseux), sans oublier les *Spartina*.

La faune et surtout la flore microscopiques sont infiniment plus nombreuses et plus variées : Foraminifères, Flagellés, Nématodes et surtout Diatomées, Cyanophycées et surtout Bactéries. Une grande partie de cette vie microscopique est d'origine planctonique.

16. — La vase est, plus que les sables, le sédiment type des estuaires et surtout des estuaires bretons. Toutes les slikkes sont constituées de vase. Les sables se rencontrent dans les chenaux et leur abondance est fonction du débit fluvial.

Le faciès vaseux est largement réparti : on le rencontre dans les estuaires du littoral atlantique, tant oriental qu'occidental. Il dépasse parfois le cadre même de l'estuaire et s'étend le long du littoral lui-même; telles les vases (poto-poto) de la côte de Guinée, et celles de la côte charentaise.

## Quatrième Partie. — LES MÉCANISMES DE SÉDIMENTATION

### CHAPITRE PREMIER. — LES HYPOTHÈSES EXPLICATIVES CLASSIQUES

Comme je l'ai très rapidement signalé dans l'introduction de ce travail, deux hypothèses classiques, et déjà anciennes, étaient, jusqu'à ce jour, communément admises pour rendre compte des phénomènes de sédimentation particuliers aux estuaires.

#### PREMIÈRE HYPOTHÈSE

##### Finesse des particules et sédimentation par gravité.

Cette hypothèse est celle qui vient tout naturellement à l'esprit. Les eaux courantes, les eaux de ruissellement désagrègent les roches du bassin versant en éléments dont la dimension dépend de leur nature, de leur structure et de leur état de fraîcheur. On se représente toujours le haut cours des rivières comme encombré de gros blocs, de rochers, qui sont réduits par l'action des eaux courantes en éléments de plus en plus fins : galets, graviers, sables et finalement « argiles », « limons » ou mieux, poudres, à mesure que l'on s'éloigne de la tête de la rivière. J. BOURCART (1941) a montré qu'en réalité les sables, qui sont essentiellement quartzeux, ne sont pas dus au concassage de galets primitifs de quartzites, mais à la désagrégation primitive du granite. Le quartz du granite, qui peut donner des dépôts marins de sables, puis de grès, lesquels, à leur tour, peuvent être repris par l'érosion, fournit l'essentiel (du point de vue statistique) du matériel sableux.

Les géographes pensent que les grains de sable s'useraient par roulement sur le fond par chocs entre eux, se pulvériseraient finalement jusqu'à donner les « limons ». A mesure que les particules diminuent de diamètre moyen, la vitesse du courant fluvial diminue aussi et elle devient juste suffisante pour transporter, ou tracter, les éléments fins ne dépassant pas une certaine limite. Il y a, si l'on veut, interdépendance entre la vitesse limite du courant et la dimension limite de la particule ou du grain. Toujours est-il que, dans l'estuaire, n'arriveraient du bassin versant que des grains fins et usés, à quoi s'ajouteraient naturellement les produits encore plus fins enlevés aux sols (argiles, humus) et à la désagrégation des roches du bassin versant (argiles, silicates des granites, etc...), tous éléments transportés en suspension.

Tout ce matériel, auquel on peut ajouter les produits de lessivage des versants, aboutirait à l'estuaire, où les vitesses du courant seraient « très faibles » et où l'agitation de la mer ne se fait pas encore sentir : là, ils se sédimenteraient par gravité (ce qu'ils n'avaient pu faire jusqu'alors), et constitueraient ces dépôts fins que géologues et géographes dénomment, suivant leur goût et leur humeur : vase, limon, argile, limon argileux, etc..., et qui, dans les pages précédentes, ont été étudiés sous le nom de vase.

DISCUSSION. — Le mécanisme de sédimentation des éléments par dimensions décroissantes est, dans une certaine mesure, conforme à la réalité : c'est celui qui a lieu dans un

cours d'eau aboutissant à une mer sans marée et se terminant par un delta. Mais, dans un estuaire, les vitesses de courant ne sont pas plus faibles que dans la partie du cours d'eau située en amont, bien au contraire. Sauf au moment des étales, les vitesses sont, de beaucoup, supérieures à celles du cours d'eau et aussi à celles des courants de marée en mer ouverte : on ne voit pas très bien, dans ces conditions, comment peuvent se déposer les éléments fins. Vitesses des courants de flot et de jusant, tourbillons et turbulence s'opposent à une sédimentation fine par gravité. On peut même ajouter qu'un certain nombre de facteurs physiques viennent encore diminuer les chances de sédimentation par ce mécanisme : ce sont par exemple la densité, souvent très élevée, des eaux de l'estuaire (salinités marines ou saumâtre); la viscosité du milieu, qui est d'autant plus grande que la salinité est plus élevée, ce qui diminue et freine d'autant la sédimentation par gravité.

Enfin, il faut aussi tenir compte d'un fait tout à fait remarquable, c'est que le débit, tant roulé que flotté, est insignifiant dans les rivières bretonnes, surtout en été. Je sais bien qu'il n'en est pas de même pour les estuaires du type Seine, Loire ou Gironde; mais les dépôts de vase sont, au moins, aussi puissants dans les estuaires bretons que dans les derniers cités. Bien plus, comme on l'a vu, les dépôts de vase sont presque les seuls à se former dans les estuaires bretons, les sables étant statistiquement rares, alors que c'est l'inverse dans les estuaires des rivières à plus forts débits.

Il faut donc admettre que les sables constituent bien en partie un apport fluvial, amené jusqu'à l'estuaire par roulement sur le fond et qui, par suite du jeu alterné des courants de marée, ne progresse que lentement vers la mer et s'use, en somme, sur place, comme B. RAJČEVIĆ (1938) l'a montré pour les sables de l'estuaire de la Seine. Au contraire, pour les vases, on se trouve dans l'embarras, car les eaux des estuaires bretons ne transportent que très peu de matières en suspension. Rien n'est plus remarquable à ce sujet que d'observer l'opposition qui existe entre les eaux claires et limpides de la rivière Penzé, et les eaux troubles et très chargées dès qu'on arrive dans l'estuaire. Une idée vient alors à l'esprit, c'est que les éléments fins qui constituent les vases sont d'origine marine. Cette origine ne peut, je crois, être contestée et les chapitres précédents aboutissent normalement à cette conclusion. Il ne faut cependant pas totalement négliger un apport minéral fin et fluvial, qui peut se mêler à l'apport marin. Mais cela n'est pas une raison pour que la sédimentation des troubles en suspension dans l'estuaire se fasse par gravité, sauf peut-être pendant un temps très court, aux moments des étales de courants.

Il ne faut pas oublier, non plus, que les vases, déposées, sont essentiellement polydispersées et contiennent du sable, et qu'étant donné les différences considérables entre la dimension des éléments constitutifs, on s'expliquerait mal qu'ils se sédimentent simultanément par gravité. Pratiquement, suivant les lois qui régissent le transport des grains dans un courant d'eau, les poudres et les colloïdes ne devraient jamais se déposer dans l'estuaire, mais être entraînés en mer jusqu'à ce qu'ils trouvent un milieu suffisamment calme.

Un fait est cependant là : les vases sont les dépôts dominants dans les estuaires.

## DEUXIÈME HYPOTHÈSE

## 1. — Les électrolytes de l'eau de mer flocculent les matières en suspension.

La deuxième hypothèse qui ait été émise, pour rendre compte de la sédimentation des vases dans les estuaires, est d'ordre physicochimique : les électrolytes contenus dans l'eau de mer flocculeraient subitement les particules amenées par les eaux fluviales. Il est difficile de savoir quel fut le premier auteur à émettre cette hypothèse et on ne sait pas où trouver un exposé convenable de ce phénomène. Il semble que ce sont des expériences de laboratoire qui conduisirent les géologues et les géographes à envisager ce mécanisme physicochimique comme une explication d'un phénomène naturel. Bien avant que la notion de pH ait transformé les idées que l'on se faisait des équilibres dans les solutions d'électrolytes, BARUS, aux Etats-Unis (1886), et BODLANDER, en Allemagne (1893), étudièrent la sédimentation des fines particules dans les liquides. De là à extrapoler à l'échelle naturelle, il n'y avait qu'un pas qui a été franchi on ne sait trop comment. Mais toujours est-il que, jusqu'à ce jour, géologues et géographes, insatisfaits par la sédimentation par gravité, ou séduits par des notions de physicochimie, — d'ailleurs complexes et finalement assez peu étudiées, même du point de vue théorique, — accordèrent toute confiance à cette théorie de la floculation des particules par les électrolytes de l'eau de mer.

De quoi s'agit-il donc ? Si l'on disperse des particules suffisamment fines (ou mieux des micelles colloïdales) dans un liquide et que la suspension ainsi obtenue soit stable, il suffit d'ajouter une certaine quantité d'électrolyte (acide, base ou sel) pour que les particules se rapprochent les unes des autres, s'agglomèrent, forment des flocons qui tombent au fond du récipient où ils s'accumulent, laissant au-dessus d'eux un liquide clarifié. Si l'électrolyte est ajouté goutte à goutte, la prise en flocons est imperceptible et il est alors nécessaire, pour constater leur formation, de recourir au phénomène optique de diffusion de la lumière que constitue l'effet Tyndall (un faisceau lumineux frappant les particules dans une direction perpendiculaire à celle de la visée). Mais la floculation peut être macroscopique et, dans ce cas, la recherche de l'effet Tyndall est inutile.

La floculation mesurée par la vitesse de sédimentation d'une suspension dépend de la valence des ions et on a constaté (BODLANDER) que, par exemple, les sels des métaux monovalents (chlorure de sodium, de potassium, etc...) avaient un pouvoir flocculant plus faible que celui des métaux polyvalents (chlorure de magnésium, sulfate de magnésium, etc., etc...).

La quantité d'électrolyte à ajouter à une suspension pour obtenir sa floculation dépend donc de sa valence, et c'est notamment à la présence de sels de magnésium (fort pouvoir flocculant) dans l'eau de mer qu'on a attribué la floculation des particules amenées jusqu'aux estuaires (P. URBAIN, 1933). Mais la floculation dépend elle-même de la concentration de la suspension, de la viscosité du liquide, et surtout de la nature des particules, ou plus exactement de leur charge électrostatique. En effet, certaines particules seront électropositives, d'autres électronégatives, et la charge des ions qui détermineront la floculation ne devra donc pas être la même.

Grâce à la notion de pH, les conditions de floculation d'une suspension donnée ont pu être précisées.

Si, à une suspension, on ajoute progressivement un électrolyte, on constate que le pH de la suspension varie, plus ou moins, suivant que le liquide intermicellaire, ou interparticulaire, est plus ou moins tamponné, mais, à un moment donné, la suspension floccule. Ce phénomène a lieu pour une certaine valeur du pH. A cette valeur critique du pH correspond ce que l'on appelle le point isoélectrique des particules en suspension. Pour qu'on puisse parler de point isoélectrique, encore faut-il qu'il s'agisse de substances dites amphotères, c'est-à-dire qui peuvent, selon la nature (pH) du liquide dans lequel elles sont en suspension, changer de signe, c'est-à-dire devenir électropositives (1) si elles étaient primitivement électronégatives ou inversement.

Le point isoélectrique correspond au moment où le déplacement des particules dans le champ électrique est nul, c'est-à-dire au moment où la charge électrique des particules est nulle. A ce moment, les particules étant sans charge, la suspension a perdu la principale cause de stabilité. En effet, « la stabilité de la suspension est due en grande partie, suivant les physicochimistes, à l'électrisation des particules qui, par suite des forces de répulsion qu'elle fait naître entre ces particules, s'oppose à leur agglutination » (BOUTARIC [1931]).

Si l'on continue à ajouter des quantités croissantes d'électrolytes de manière à dépasser largement le pH du point isoélectrique dans le sens de l'alcalinité ou de l'acidité, et que l'on agite la suspension, ou bien les flocons, primitivement formés, resteront tels et se sédimenteront de nouveau dans le fond du récipient quand l'agitation aura cessé, ou bien, au contraire, ils se désagrégeront et reformeront une suspension stable. Dans le premier cas, on peut dire que l'on a affaire à un phénomène analogue à celui de la coagulation de l'albumine par la chaleur; dans le second, on dit qu'il y a peptisation, c'est-à-dire, en somme, l'inverse de la floculation.

Ce rappel très sommaire des propriétés physicochimiques des suspensions, ou plus exactement des solutions colloïdales, étant fait, il est maintenant nécessaire de voir en quoi elles peuvent expliquer la sédimentation des vases dans les estuaires.

Quels sont les éléments existants en suspension dans les eaux d'estuaire qui peuvent être soumis à ces phénomènes physicochimiques. Il semble, avec J. DUCLAUX (1934), que les particules  $> 0$  mm. 01, ne font plus partie des suspensions et que, par conséquent, les phénomènes de floculation ne les concernent pas. Par contre, ils joueront pour les particules comprises entre 0 mm. 01 et  $0,1 \mu$ , et *a fortiori* pour les micelles colloïdales (de  $0,1 \mu$  à  $0,001 \mu$ ). Ceci ne veut pas dire qu'il n'existe pas, en suspension dans les eaux, des particules supérieures à 0 mm. 01, mais elles ne se maintiennent dans cette situation d'instabilité que par suite de la turbulence des courants.

Donc, une importante fraction des poudres et tous les colloïdes sont susceptibles, quand ils sont en suspension stable dans les eaux, d'être flocculés par un certain apport d'électrolytes; — ou, pour parler autrement, si les poudres et les colloïdes sont en suspension stable entre certaines limites de pH, ils sont susceptibles d'être flocculés lorsque le pH du point isoélectrique, caractéristique de la nature chimique de la particule, est atteint.

Mais, avant d'aller plus loin, il est ici nécessaire de faire une remarque qui concerne l'emploi du terme de floculation. Au laboratoire, floculation signifie prise en flocons des

(1) Le signe électrique des particules (micelles colloïdales) se mesure en plaçant dans la solution deux électrodes soumises à une différence de potentiel, et en notant l'électrode vers laquelle elles se dirigent (anode ou cathode). Cette opération s'appelle une cataphorèse.

micelles et sédimentation de celles-ci au fond du vase : l'intensité de la floculation peut se mesurer même par la vitesse de sédimentation. Mais, dans les conditions naturelles des estuaires, il n'est plus possible d'accepter implicitement une sédimentation consécutive à la floculation.

En effet, si les flocons se sédimentent plus rapidement que les particules élémentaires et isolées en milieu calme (dans une éprouvette, par exemple), il est facile de constater que la plus petite agitation suffit à maintenir ces flocons en suspension. C'est ce qui a nécessairement lieu dans un estuaire où la turbulence des courants est telle que les particules grossières demeurent elles-mêmes en suspension. Les flocons qui pourront se former dans un estuaire ne se sédimenteront donc pas plus rapidement que les particules isolées non agrégées. On peut même se demander jusqu'à quel point leur flottabilité n'est pas accrue.

Constate-t-on, en fait, la présence de flocons dans les eaux d'estuaire ? Il n'est pas possible de dire que l'existence de flocons est un phénomène général, et d'ailleurs cela ne se comprendrait pas. Pour qu'ils existent, il ne faut pas l'oublier, le pH du point isoélectrique doit être atteint; or, celui-ci est variable avec la nature des particules en suspension; d'autre part, comme on l'a vu, le pH des eaux d'estuaire peut varier avec la profondeur, avec la marée, en un même point et dans le sens longitudinal pour un même estuaire. Il est donc normal qu'ici, on trouve une eau chargée de flocons; là, une eau où les particules en suspension sont isolées. Mais les variations physicochimiques du milieu ne se font pas tant par mélange d'eaux d'origine et de nature différente que par remplacement successif, au cours de la marée, de compartiments d'eau possédant une individualité et des caractères qui ne changent que très peu.

Un certain volume d'eau (d'eau de mer, par exemple) possède une salinité et un pH qui, au cours de la marée, varie très peu; si ce pH correspond au point isoélectrique des particules en suspension, on constatera la présence de flocons dans ce volume d'eau. Quand ce volume arrive, grâce au flot, en un certain point de l'estuaire, il remplace à un moment donné un volume d'eau moins salée possédant sans doute un pH différent, peut-être des particules de nature différente et dans lequel il n'y avait pas floculation.

Ainsi, au cours de la marée, peuvent se succéder des eaux où la présence de flocons est remarquable et des eaux à particules libres. Avec le jusant, ces unités se déplacent vers l'embouchure; avec le flot, elles remontent l'estuaire. C'est ce que J. BOURCART et moi-même avons pu observer, d'une façon assez exceptionnelle, par le travers de la Pointe de Penzornou, dans l'estuaire de la Penzé. Sur une distance d'environ 500 m., les eaux d'estuaire étaient chargées de flocons macroscopiques, en formes de comètes (déformation due probablement par le courant), qui flottaient entre deux eaux. Une certaine limite dépassée, ces flocons disparurent et de nouveau apparurent des particules libres.

Les flocons du type précédent, c'est-à-dire d'un diamètre atteignant le centimètre et plus, sont rarement observables. JACQUES BOURCART, B. RAJČEVIĆ, et moi-même, en avons cependant remarqué dans l'estuaire de la Seine, à Tancarville. Comment peut-on les expliquer ? Sans doute par attraction entre des flocons primitivement plus petits. Toujours est-il que, lorsque ces flocons de taille exceptionnelle sont observables, les eaux dans lesquelles ils baignent sont très nettement clarifiées : on n'a plus l'impression d'eaux troubles, mais d'eaux limpides dans lesquelles nageraient des larves pisciformes.

Ce qui est beaucoup plus courant, c'est de constater l'existence de flocons d'un dia-

mètre juste perceptible à l'œil. Dans le courant lui-même, on ne peut guère distinguer s'il s'agit de particules agglomérées ou de particules libres; pour mieux les observer, il suffit de faire une prise d'eau et d'observer à travers le verre (la bouteille *Pellerin* [1939] est très recommandable pour cet usage). Préciser la valeur de pH à laquelle se produit cette floculation n'est pas possible, car j'ai pu constater la présence de flocons dans des eaux dont le pH était très différent. Il faudrait pouvoir, dans chaque cas étudié, recueillir ces flocons, les laisser sédimenter, les peptiser et étudier alors, *in vitro*, leur floculation par ajoutage progressif et lent d'électrolytes.

Pourtant, mon ami JEAN-CLAUDE VLÈS, et moi-même, avons tenté, à Rabat, de rechercher le pH pour lequel les micelles colloïdales des vases de l'estuaire du Bou-Regreg flo-culaient. Dans ce but, nous avons dispersé des vases de la slikke provenant de la rive gauche de l'estuaire (au niveau du Pont-route) dans de l'eau distillée. Les sables, les éléments grossiers et les poudres se sédimentèrent rapidement par gravité et, au bout de 24 heures, nous avons recueilli la suspension colloïdale surnageante. Nous avons acidifié la solution jusqu'à  $\text{pH} = 5$ , sans obtenir de floculation; puis, par ajoutage progressif de potasse, nous avons constaté un coefficient tampon très élevé dans la zone de pH acide, et ce n'est qu'au bout de la 100<sup>e</sup> goutte, quand le pH passait brusquement de 5,4 à 8, qu'une nette floculation se produisait.

Par ailleurs, en opérant d'une façon identique avec des vases de l'estuaire de la Penzé, j'ai pu noter que la floculation de la solution colloïdale ne se produisait qu'à des pH très alcalins ( $\text{pH} = 9$ ) et qu'il semblait y avoir peptisation pour des pH très acidés.

En réalité, ce ne sont là que des résultats sans grande signification et cette étude mériterait d'être reprise avec soin. C'est ce que je me propose de faire ultérieurement. Mais en ce qui concerne les phénomènes de la sédimentation dans les estuaires, elle n'est pas nécessaire, car il suffit de savoir que, parfois, les eaux contiennent des flocons dont la densité est voisine de celle de l'eau; parfois, ils n'en contiennent pas. La floculation des particules en suspension n'est donc pas le phénomène général et explicatif du dépôt des vases que l'on avait supposé. Qu'elle existe ou qu'elle n'existe pas, le problème de la sédimentation vaseuse dans les estuaires reste posé.

En effet, *non seulement floculation ne veut pas dire, dans les estuaires, sédimentation; mais encore, il ne faut pas oublier que, dans la deuxième partie de ce travail, on a distingué deux zones essentielles : une zone où, au cours de la marée, le milieu subit des variations physicochimiques, et une zone, en amont, où la marée ne se traduit que par l'onde mécanique. Et pourtant, dans ces deux zones, se déposent des vases.*

Si donc, on peut supposer et admettre que, dans la première zone, les variations physicochimiques du milieu (pH) entraînent une floculation des suspensions, dans la deuxième zone, il ne peut en être question. Il faut donc chercher une autre explication à la présence des vases dans les estuaires.

## 2. — Mécanismes proposés.

### La teneur en suspensions et le vidage périodique des eaux d'estuaire.

Un certain nombre de faits doivent, il me semble, être encore une fois rappelés.

1° Alors que la teneur en suspensions est assez faible, sinon nulle (fleuves bretons), dans les eaux fluviales en amont de l'estuaire, et dans les eaux marines, au large de l'em-

bouchure (sauf en jusant et à l'exception des eaux littorales avoisinant les embouchures des fleuves à fort débit), les eaux emmagasinées dans les estuaires ont une teneur élevée en suspensions pouvant atteindre plusieurs grammes par litre, mais étant en moyenne de plusieurs décigrammes.

2° Deux fois par jour, dans un estuaire, la marée se fait sentir; autrement dit, pendant 12 heures (et parfois plus), les eaux se retirent.

3° Les dépôts de vase, s'ils existent parfois dans les chenaux, sont surtout la caractéristique essentielle des rives où ils forment (si des constructions humaines ne viennent pas tout modifier), les slikkes,

Il semble logique de relier ainsi ces trois faits : il existe, dans les estuaires, un important stock de matières en suspension qui, par le jeu de la marée (descendante), se dépose en partie sur les rives et donne finalement les vases de la slikke. C'est ce qu'on appelle assez improprement un colmatage. C'est, si l'on me permet cette comparaison, ce qui se passe lorsque l'on vide une baignoire contenant de l'eau savonneuse salie. Les suspensions, floculées ou non, dans l'eau, adhèrent aux dépôts préexistants des rives lorsque la lame d'eau devient très mince et ce mécanisme d'attraction « pseudo-capillaire » se poursuit pendant chaque jusant. Il explique en même temps la présence d'une pellicule de vase le long des parois verticales des murs de quais et de tous les objets possibles, qui serait inexplicable par un autre processus. On m'objectera peut-être que, dans les estuaires plus importants, comme dans la Gironde, les dépôts de vase de la slikke ne sont pas importants par rapport à ceux des chenaux. Il me semble pourtant que, dans l'estuaire de la Seine, de la Loire ou de la Gironde, les vases bordières ont une extension qui est loin d'être négligeable et les vases des rives de l'estuaire de la Seine, entre Tancarville et le Havre, par exemple, acquièrent un développement tout à fait remarquable à basse mer.

Enfin, dans les estuaires bretons, le chenal, à basse mer, est très souvent insignifiant et l'estuaire entier semble comblé par des vases de la slikke. Tous ces dépôts sont dus, non pas à un phénomène physicochimique complexe, non pas aux jeux compliqués de tourbillons (1), mais simplement à ce que la marée descendante (le jusant) abandonne les particules en suspension qui se trouvent dans la tranche d'eau qui se retire. Il s'agit, si l'on veut parler comme les physiciens, de phénomènes de surface. Il y a sans doute lieu de distinguer; d'une part, l'attraction pseudo-capillaire, qui ne peut se faire qu'à la surface de l'eau et l'adhésion (collage) à la vase et aux objets mouillés, qui est une adsorption. Et cela rend compte des dépôts de vase tout le long des estuaires, là même où la marée ne se traduit que par des variations dynamiques du milieu.

On comprend facilement que si les suspensions sont agrégées en flocons, les phénomènes de surface seront plus intenses que dans le cas de fines particules isolées, et c'est dans ce sens que la floculation facilite la sédimentation.

(1) Cette façon d'expliquer la sédimentation des vases, je l'ai exprimée, en accord avec J. BOURCART et B. RAJCEVIC (1941), dans une note à l'Académie des Sciences, parue dans un fascicule contenant une note de L. GLANGEAUD (1941), concernant le même sujet, mais où l'auteur fait prévaloir les phénomènes tourbillonnaires pour expliquer les vases du chenal de l'estuaire girondin. Dans une note parue très récemment au *Bulletin de la Société géologique de France* (5<sup>e</sup> série, XI, n° 7-8-9, pp. 371 à 388, 1941), reçue par les membres de la Société à la fin d'avril 1943), L. GLANGEAUD signale qu'il a établi des diagrammes de corrélation entre la salinité, le débit solide, le pH des eaux d'estuaire. Je ne connais pas de publications où l'auteur ait donné des résultats numériques qui permettent de se rendre compte de ce qui se passe dans l'estuaire qu'il a étudié.

L'explication qui vient d'être proposée n'est évidemment pas très originale et, en réalité, est connue depuis bien longtemps, puisque c'est par ce mécanisme que se déposent les limons d'inondations lorsque les eaux des crues se retirent. Mais il était bon de dire que ce phénomène, de caractère exceptionnel pour les fleuves, se trouve réalisé deux fois par jour dans les estuaires où la marée, phénomène mécanique, se fait sentir.

Un certain nombre de conditions locales favorisent encore ce mécanisme simple de dépôt. Ainsi une slikke largement développée, constituant un lobe convexe, augmente considérablement la surface d'attraction des particules. Des plantations de *Spartina* facilitent sans aucun doute, comme le prétend OLIVIER (1928), le dépôt des particules en suspension; dans ce cas, le régime de l'écoulement de l'eau étant rendu laminaire entre les feuilles, le dépôt se fait plus aisément. Il en est de même des échancrures de la rive où règne un calme qui n'existe pas ailleurs, etc...

ORIGINE DES PRODUITS EN SUSPENSION. — L'examen des matières en suspension, flocons ou particules libres, permet de constater qu'il s'agit des éléments constitutifs des vases. J. BOURCART et B. RAJČEVIĆ ont décrit la composition des flocons recueillis dans l'estuaire de la Seine; ils y ont noté la présence de granules de matière organique, de poudre calcaire, de fins grains de sable et de toute la faunule et la florule qui constituent le plancton d'estuaire. Le complexe qu'est la vase se trouve donc déjà en partie formé avant son dépôt. En recueillant le plancton de l'estuaire de la Penzé, j'ai moi-même observé, à côté d'un très fort pourcentage de matière vivante, une fraction inorganique essentiellement faite de grains de quartz très fins et de quelques éléments micacés.

L'origine de tous ces éléments est variée; dans les estuaires des fleuves à débit important, la plus grande partie des particules inorganiques en suspension provient du bassin versant; une autre, plus faible, provient des roches attaquées par la mer et des dépôts du large.

Les particules organiques sont, pour la plupart, d'origine planctonique et toujours de plancton marin dans les petits estuaires bretons.

La teneur en suspensions des eaux d'estuaire; notablement plus élevée que celle des eaux fluviales et des eaux marines, s'explique, il me semble, par le jeu même des courants de marée. On a vu, en effet, que le volume d'eau emmagasiné dans un estuaire, avec le flot, ne s'écoule pas entièrement en mer avec un jusant; il demeure donc, à chaque marée, un reste de suspensions qui ne va pas jusqu'à la mer et qui ne se sédimente pas. Par ailleurs, le fleuve peut apporter de nouvelles suspensions, et la marée, l'élément planctonique, apports qui s'ajoutent aux suspensions résiduelles.

Ainsi se constitue ce que L. GLANGEAUD (1938) appelle le « bouchon vaseux », caractéristique dominante de l'estuaire, qui est ballotté de l'aval vers l'amont et de l'amont vers l'aval, avec la marée. Une partie de ce bouchon vaseux se sédimente à chaque marée; mais, dans l'ensemble, les apports compensent les dépôts.

Il ne semble pas possible de faire appel à une érosion et à une remise en suspension des vases déposées pour expliquer la teneur en suspensions des eaux d'estuaire, d'autant plus que les courants devraient atteindre, ainsi que HJULSTROM (1935) l'a montré, des vitesses capables de transporter des galets.

SÉDIMENTATION DANS LES CHENAUX. — Dans les petits estuaires bretons, on l'a déjà dit, la hauteur d'eau dans le chenal est insignifiante : quelques centimètres. Il peut donc

se déposer des vases pendant l'étalement de basse mer. Quand la profondeur devient plus grande, on trouve surtout du sable, vraisemblablement amené par roulement, soit du bassin versant, soit du littoral, soit du plateau continental.

Dans les grands estuaires, à côté de sable ayant la même origine, on trouve parfois des vases (L. GLANGEAUD fait appel à des phénomènes tourbillonnaires pour expliquer leur présence). En tout état de cause, la formation et le déplacement des bancs de sable dans les chenaux d'estuaire obéissent aux règles que les hydrodynamiciens ont établies pour les rivières. Mais les phénomènes peuvent atteindre cependant une plus grande complexité du fait des courants alternatifs de marées.

EN RÉSUMÉ, j'ai essayé de montrer, dans cette quatrième partie :

- 1° que les vases ne se déposaient pas par simple gravité;
- 2° que les vases n'étaient pas des dépôts consécutifs à la floculation des particules par les électrolytes de l'eau de mer;
- 3° que c'est le jeu alternatif bi-quotidien de la marée qui permet, aux particules en suspension dans l'estuaire, de se déposer par attraction et adsorption sur les dépôts préexistants de la slikke.

## *Cinquième Partie.* — ÉVOLUTION DES SÉDIMENTS FLUVIO-MARINS

### CHAPITRE PREMIER. — ÉVOLUTION DES VASES

Il est intéressant, à beaucoup de points de vue (géologique, minéralogique, agricole), de rechercher et d'étudier les stades d'évolution des vases de la slikke. Les sables sont laissés de côté dans ce chapitre, car sables ils sont, sables ils resteront leur vie géologique durant, à moins qu'ils ne deviennent des grès et peut-être de nouveau des sables.

Le premier stade d'évolution de la slikke est le schorre; le deuxième, le polder. Le terme d'évolution est pris dans un sens morphologique et non chimique, car la vase doit évoluer même lorsqu'elle reste slikke. Ce qui est important dans la transformation de la slikke en schorre, c'est que le dépôt, au lieu de subsister en milieu aqueux (recouvert d'eau), devient un dépôt aérien qui n'est plus jamais recouvert par l'eau (sauf en de très rares occasions).

#### 1. — Le schorre.

L'origine géologique du schorre n'est pas en question ici, car elle fait l'objet d'un chapitre suivant. Le schorre est une zone d'alluvions formant terrasse au-dessus de la slikke et séparée d'elle par un talus. Suivant la hauteur de ce talus et l'amplitude de la marée, le schorre est ou n'est pas recouvert par les marées de vives eaux exceptionnelles. Très souvent, l'homme intervient pour empêcher toute ingression de la mer sur le schorre et il construit des digues protectrices à cet usage. Dès lors, le schorre évolue rapidement et perd, peu à peu, le faciès slikke.

Le schorre des estuaires étudiés est constitué par des alluvions fluvio-marines, très généralement du type de la vase sableuse. On y trouve des coquilles de *Scrobiculaires*, des

carapaces de Diatomées, des spicules d'Eponges, des tests de Foraminifères, etc...; par ailleurs, les teneurs en carbone, en azote et en fer, se rapprochent, tout au moins quand l'évolution n'est pas très poussée, de celles des vases de la slikke.

| Localités                                                                  | C    | N    | Fe  | C/N   | C/Fe |
|----------------------------------------------------------------------------|------|------|-----|-------|------|
| Schorre dans l'estuaire de la Penzé (niveau du pont de chemin de fer)..... | 4,13 | 0,28 | 2,7 | 14,34 | 1,54 |
| Schorre Bou-Regreg (villâ d'été du Pacha)....                              | 2,70 | 0,20 | 7,3 | 13,50 | 0,37 |

La salinité du schorre peut donner aussi une indication dans ce sens.

Il était donc primitivement constitué par de la vase, type slikke, étudiée précédemment. Mais son émerision l'a transformé. Il se dessèche considérablement, perd de ce fait la plupart des propriétés physiques de la vase : plasticité, thixotropie, imperméabilité, etc... Cependant, il reste cohérent, car la dimension des éléments qui le constituent et l'existence de liant colloïdal font que les forces de cohésion, à sec, sont très fortes. Il perd la couleur noire primitive des vases et devient, suivant la teneur en fer et en matière organique, gris clair, jaune, ocre et même rouge. Mais la dessiccation se poursuivant, il se craquèle, en surface tout d'abord, puis de plus en plus en profondeur; l'homogénéité d'ensemble primitive se résoud en agrégats, et dès lors le schorre devient perméable. Cette perméabilité tient donc à une structure secondaire et non à la nature ou à la dimension des éléments du matériau.

La deuxième conséquence de cette émerision est la conquête du schorre par une végétation phanérogamique halophile et une faune terrestre. Flore et faune interviennent à leur tour pour transformer peu à peu la vase primitive en un sol de prairie. Cette évolution progressive a été très bien étudiée en Hollande, notamment à l'occasion de l'assèchement du Zuyderzée qui mettait à l'air libre des surfaces considérables de vase marine littorale. Il était intéressant pour les Hollandais que l'évolution de cette vase se fasse le plus rapidement possible, de manière à pouvoir l'utiliser pour l'agriculture ou l'élevage.

Le schorre constitue une véritable terrasse d'altitude relative très faible (de quelques décimètres à 2 m.), au-dessus de la slikke. Généralement, la limite entre schorre et slikke est très nette : le schorre se termine par une falaise très raide au-dessus de la slikke. La falaise est surtout visible quand le schorre n'est pas recouvert par l'eau à haute mer : il s'établit ainsi un nettoyage des produits de désagrégation du schorre. Celui-ci, en effet, par suite des fentes de dessiccation, se débite à la limite de la falaise, en blocs plus ou moins importants. Ceux-ci sont en général déblayés et remis en suspension par l'arrivée de la marée, mais il arrive souvent aussi qu'il se forme de véritables galets : ces galets de vase sont allongés, mais peu aplatis.

Le schorre peut être constitué par de la vase homogène; mais il arrive parfois qu'il ait l'aspect conglomératique, comme c'est le cas au coude de Trégarvan, sur l'Aulne. On y voit en effet, essentiellement localisés en un lit médian, une série de blocs de quelques centimètres, peu roulés, aux arêtes franches et non émoussées. L'origine de tels blocs, mêlés à un sédiment, par ailleurs très fin et relativement homogène, surprend au premier abord.

L'observation des phénomènes actuels permet de se rendre compte que ces cailloux

proviennent de la désagrégation locale des versants et qu'ils n'ont pas été transportés. Tombés sur la slikke, ils ne subissent pas de déplacement, ils s'enfoncent légèrement et sont peu à peu recouverts par de nouvelles couches de vase.

La désagrégation secondaire actuelle du schorre libère ces blocs qui tombent maintenant sur la slikke et formeront sans doute un nouveau dépôt conglomératique.

La pente de la surface topographique du schorre d'amont en aval est habituellement insignifiante (0,002 %), et l'altitude relative schorre-slikke ne varie guère. Il y a cependant des exceptions : comme celle du Bou-Regreg, sur laquelle on reviendra. La pente transversale du versant de la vallée à la falaise au-dessus de la slikke est également très faible et, quelquefois même, elle semble nulle.

Le schorre est souvent découpé par des vallées affluentes de l'estuaire : ce sont des marigots. La plupart du temps, ils sont presque à sec à basse mer (débit d'eau douce insignifiant ou nul) ; mais, à haute mer, ils s'emplissent d'eau. C'est dans ces vallées affluentes que la structure du schorre apparaît le mieux, et il ne reste plus aucun doute sur l'identité des sédiments qui le composent avec les vases actuelles.

## 2. — Evolution du schorre en polder et marais maritimes.

D. J. HISSINCK (1932) a montré que les dépôts émergés perdent tout d'abord une partie du sel qu'ils contenaient primitivement. Envahis par la végétation, ces dépôts se transforment en ce que localement on appelle « *Kwelder* », terme qui correspond sensiblement à celui de schorre. La transformation se poursuivant, on atteint un stade propre à l'agriculture, ou polder.

En ce qui concerne les dépôts du Zuyderzée, HISSINCK les qualifie d'argilo-sableux (comprendre, « argile », au sens des pédologues, c'est-à-dire fraction dimensionnelle). Ils étaient noirs (présence de sulfure de fer) : teneur en eau de 172 % ; salinité de 2,7 % ; carbonate de calcium : 12,2 % ; humus (matière organique totale ?) : 3,66 %.

Du point de vue granulométrique : fraction sable : 19,7 %, et fraction « argile » (lire poudre + précolloïde + colloïde) = 61,6 %.

Toutes ces données concordent bien pour permettre d'appeler ce sédiment une vase et même une vase à caractère fluvio-marin (salinité assez faible). L'évolution de cette vase émergée a eu lieu rapidement, car déjà, au bout de deux ans, la salinité était presque nulle, la structure en agrégats était acquise, l'échange des bases (argile sodique en argile calcique) avait eu lieu par l'intermédiaire de l'acide carbonique dissous dans l'eau sous forme de bicarbonate.

L'aération, pour que l'évolution se poursuive rapidement, est nécessaire : circulation de l'eau. Le milieu anaérobie devient aérobie et les sulfures se transforment en sulfates.

La teneur en azote est de 0,3 %, le rapport C/N est environ égal à 6 et, selon HISSINCK, cette teneur en azote (qui est de l'ordre de grandeur des vases étudiées ici), ne permet pas de cultures ayant des exigences élevées.

On voit donc que la transformation de la vase de la slikke en vase du schorre est fonction de l'émersion qui modifie complètement le milieu. Cette émersion durant, — par suite des conditions naturelles ou de travaux humains, — l'évolution se poursuit en un stade de polder, jeune, encore salé, puis en polder propre à l'agriculture.

Si c'est en Hollande et en Belgique que les phénomènes de poldérisation sont les mieux étudiés, il n'en reste pas moins vrai que le littoral français de la Mer du Nord et de l'Atlantique comprend de très grandes étendues de vases marines ou fluvio-marines, conquises récemment au domaine maritime. Il semble que le terme de marais, communément adopté dans le Centre-Ouest de la France, corresponde assez exactement à celui flamand de polder.

Mais, entre le schorre typique qui borde directement la slikke (estuaires bretons) et le marais qui est nettement acquis au domaine continental, existent un certain nombre de stades intermédiaires. C'est dans ces stades que je rangerai les schorres (ou « terrasses récentes » de DENIZOT [1935]) de l'estuaire de la Loire, ou des étendues comme celles qui bordent l'estuaire de la Seine, entre Tancarville et le Havre, soit le long de la rive droite, soit au contraire sur la rive gauche, — comme le marais Vernier. La plupart du temps, ces zones d'alluvions fluvio-marines récentes sont définitivement protégées des incursions de l'eau par des digues construites par l'homme pour régulariser le cours de l'estuaire. Leur évolution peut donc se faire plus rapidement que celle des schorres qui bordent les petits estuaires, où la navigation est inexistante et où les travaux de régularisation sont inconnus.

Dans le Centre-Ouest de la France, les choses se passent un peu comme dans les estuaires de la Seine ou de la Loire. Le littoral vaseux s'exhausse et des syndicats groupant les agriculteurs et propriétaires locaux décident la construction de digues protectrices (SARRAZIN et MARTIN [1937]). Les sédiments, à l'abri des incursions marines, évoluent assez rapidement et deviennent d'excellentes terres d'élevage et de culture. Le marais poitevin, le marais vendéen, le marais charentais, sont d'anciens sédiments marins et fluvio-marins. Ils ont été étudiés il y a longtemps par J. WELSCH (1919), qui y a trouvé des Scrobiculaires, d'où le nom qu'il leur a donné « d'argiles à Scrobiculaires ». — Ce sont des vases et non des argiles, ainsi que l'a montré C. ROEHRICH (1941) récemment. Mais ce sont justement des vases évoluées.

Très fines à l'origine, elles sont devenues très cohérentes en séchant, elles contiennent peu ou pas de calcaire; mais ce par quoi elles sont remarquables, c'est la présence de cristaux de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) et de cristaux de gypse que ROEHRICH y a trouvés. La présence de sulfates peut être interprétée comme une transformation des sulfures qui sont oxydés par suite du changement de milieu, résultant de l'émersion, ou comme des témoins de marais salants abandonnés (C. ROEHRICH).

Il est vraisemblable de penser que les « argiles à polder » qui forment les terrains quaternaires du Nord de la France, étudiés par G. DUBOIS (1924) sont du même type que les argiles à Scrobiculaires de WELSCH, et finalement ce sont des vases marines littorales émergées ayant évolué en schorre, polder et terrains de culture.

En conclusion que peut-on retenir ?

Il y a identité de constitution chimique, dimensionnelle et minéralogique entre les vases actuelles, les dépôts qui constituent le schorre, ceux des polders hollandais, les « argiles à Scrobiculaires » et les « argiles à polder ». Par contre, ce qui différencie ces aspects variés, c'est leur constitution physique. Celle-ci est fonction de la teneur en eau : quand les vases se dessèchent, elles perdent leurs propriétés physiques caractéristiques, acquièrent une structure secondaire très différente : cohésion à sec et formation d'agré-gats, d'où perméabilité qui conditionne la circulation de l'eau de pluie, donc l'évacuation

des sels et la réalisation en profondeur d'un milieu aérobie et oxydant. C'est ainsi que, peu à peu, la slikke émergée devient un schorre, celui-ci un polder et finalement une terre de culture.

De tels cycles évolutifs se produisent aujourd'hui sous nos yeux. Mais cette évolution, importante du point de vue humain, n'est pas celle qui intéresse le géologue; pour lui, les questions primordiales sont les suivantes : 1° Peut-on définir un faciès d'estuaire typique ? 2° Retrouve-t-on ce faciès dans la série géologique ? C'est à ces deux questions que je vais essayer de répondre maintenant.

## CHAPITRE II. — LES FACIÈS D'ESTUAIRE ET LES ÉQUIVALENTS GÉOLOGIQUES

### 1. — Existe-t-il un faciès d'estuaire ?

La géologie stratigraphique définit des faciès. Elle se base en général sur une série de caractères convergents. Les trois principaux caractères habituellement considérés sont :

1° La faune et la flore qui définissent le milieu.

2° La dimension et la nature des grains, ou éléments de la roche, qui définissent la vitesse et le mode de transport, et par conséquent l'éloignement de la côte ou de la source.

3° La structure de détail du dépôt qui définit le mode de sédimentation.

1. — Une argile à faune marine est, sans aucun doute, attribuée à un dépôt marin. On parle alors de faciès marin. Par la suite, on cherche à déterminer, pour les faciès marins, la profondeur à laquelle s'est effectué le dépôt, et le critérium le plus utilisé jusqu'à maintenant est encore la faune, ou mieux une association de faune. Malgré la sûreté attribuée par les géologues à l'association de faune, on peut émettre cependant quelques réserves qui résultent d'observations courantes. Celle qui est essentielle, c'est le transport toujours possible (qu'il s'agisse d'espèces littorales ou d'espèces pélagiques amenées par les courants) de la coquille calcaire du point ou de la zone où elle vit, vers des zones où elle ne peut pas être rencontrée normalement. A ce sujet, rien n'est plus net que les coquilles de Gastéropodes et de Lamellibranches que l'on trouve accumulées surtout dans la haute plage, alors que, de toute évidence, elles ne vivent pas à ce niveau bionomique. Que la plage soit fossilisée et l'on pourrait interpréter ces sables comme étant d'un niveau marin tout à fait différent de ce qu'il est en réalité.

Parfois aussi les interprétations d'association de faune sont assez difficiles et il me suffira de rappeler ici, comme premier exemple, celui de la craie, où l'on trouve associées une faune nettement littorale, et une microfaune nettement planctonique et pélagique. Pour concilier ces deux présences, il a fallu l'autorité de L. CAYEUX (1935).

Un deuxième exemple, qui a soulevé récemment de vives discussions à la Société géologique de France, est la question de l'origine du gypse du bassin parisien. Dans quelle mesure les arguments paléontologiques et paléographiqués, avancés par R. ABRARD (1942) et L. MORELLET, peuvent-ils infirmer les récentes observations de G. DEICHA (1942) ? Les arguments apportés par ce dernier auteur sont convaincants et le gypse, que l'on envisageait comme lagunaire jusqu'à présent, pourrait bien être marin.

On se croit habituellement sur un terrain plus ferme lorsqu'il s'agit de délimiter une formation terrestre d'une formation marine; mais comment doit-on envisager les dunes

littorales où les coquilles de Gastéropodes terrestres sont souvent associées à des coquilles de mollusques marins entraînés par le vent. Et, surtout dans le cas des microfaunes, des Foraminifères en particulier, doit-on assurer un diagnostic sur leur présence ? Les cas des vases et des sables de la Seine ou du Bou-Regreg qui contiennent des espèces marines, de la craie ou du tertiaire, font hésiter.

On parle souvent aussi de formations continentales dès que l'on a affaire à une formation rouge. Mais les vases fluvio-marines exondées et oxydées ne vont-elles pas dans certains cas donner des sédiments rouges ? Le fer quel que soit son état d'évolution et d'oxydation (la glauconie n'est pas en cause) ne doit pas être une caractéristique suffisante pour déterminer un diagnostic continental ou marin.

2. — Si l'on considère le deuxième élément qui sert à définir un faciès, c'est-à-dire la dimension des grains élémentaires, le terrain n'est guère plus sûr.

La répartition classique des éléments dans un cours d'eau est vraiment par trop idéale : galets dans le cours supérieur, sables dans le cours moyen, « argiles » ou vases dans le cours inférieur. Répartition identique en partant de la côte vers les grandes profondeurs océaniques, voilà qui est bien schématique. Les sédiments recueillis le long d'un fleuve ne sont pas toujours aussi bien classés et, quand on arrive en mer, la confusion est encore plus grande.

Il arrive très souvent qu'un sédiment, fluvial ou marin, soit polydispersé, et même parfois, qu'en un même point, coexistent des sédiments tout à fait différents : vase, sable, gravier, par exemple. C'est le cas dans les estuaires. Sédimentation fine dans le bas cours des fleuves, dans les estuaires ? Ce n'est pas aussi général qu'on le dit habituellement. En tout cas, si, dans les estuaires, les sédiments sont fins, toute déduction hydrodynamique à partir de ces dimensions serait, comme on l'a vu, contraire à la réalité. L'estuaire n'est pas un milieu calme.

3. — Quant à la stratification, il est vraiment très difficile de s'en servir pour rechercher le mode de sédimentation. On utilise, en géologie, le terme de stratification dans des sens assez différents : la succession de couches de calcaires, d'argiles, de calcaires, de marnes, de sables, etc..., représente une série stratifiée. Mais on n'entend pas, par là, qu'au sein d'une même formation il y ait des lits distincts et orientés.

Par ailleurs, on parle de stratification entrecroisée et, cette fois, il s'agit bien de la description d'un phénomène très net où l'orientation des lits joue le rôle principal. En somme, le terme de stratification est utilisé à des échelles différentes.

Dans le deuxième cas, on préfère parfois dire que telle couche est litée ou feuilletée plutôt que stratifiée. Il semble qu'il soit préférable d'employer toujours l'adjectif feuilleté à la place de stratifié, quand il s'agit de phénomènes de détail et à petite échelle. Il implique, mieux que stratifié, l'idée d'un mécanisme cyclique au cours du dépôt d'un même sédiment.

C'est couramment que la stratification, dite entrecroisée, définit, pour les géologues et les géographes, les dépôts de delta et parfois d'estuaire. On peut dire avec certitude qu'elle ne caractérise que les deltas torrentiels et à aucun degré les estuaires.

Constate-t-on la présence de dépôts feuilletés dans les estuaires ? Oui, mais c'est assez exceptionnel. Je n'ai vraiment rencontré de vases feuilletées que dans l'estuaire de la Loire : il s'agissait de dépôt dragué dans le chenal et que localement on appelle

jalle. Cette jalle, recueillie dans le nouveau chenal par un godet de drague en face de Donges, se présente sous forme d'une succession de lits de quelques millimètres d'épaisseur de vase compacte contenant peu de micas, séparés par des lits encore plus fins de micas noirs. Les plans de stratification semblent donc être dus au dépôt plus lent (en milieu tranquille) de particules lamellaires. Les sédiments vaseux de la plage de Honfleur sont également feuilletés.

Un autre exemple, qu'il m'a été permis de voir, est celui des vases feuilletées d'une île située au niveau de la Ferme Gibert, dans l'estuaire du Bou-Regreg. Il s'agit des vases de la haute slikke qui n'est pas recouverte avec toutes les marées, mais seulement en crues, ou par marée exceptionnelle. Après chaque dépôt, il y a donc émergence assez longue et c'est cette alternance qui conditionne vraisemblablement l'aspect feuilleté.

Mais, la plupart du temps, les vases de la slikke, comme les vases du schorre, ne sont pas lités. Pour qu'il y ait formation de lits, il faudrait envisager des temps d'émergence de la slikke beaucoup plus longs que les quelques heures qui séparent deux marées. On connaît assez peu d'exemples de sédiments marins actuels feuilletés, mais cette ignorance tient sans doute à ce que la pratique du carottage est d'acquisition récente. J. SCHOKLASKY (1928) a signalé que des vases littorales de la Mer Noire présentaient la succession suivante :

argile grise,  
vase calcaire,  
vase calcaire diatomique,  
vase noire sableuse.

A ces lits macroscopiques se superposent des lits microscopiques comprenant 10 à 12 couches par millimètre et où alternent une couche noire organique avec une couche noire inorganique; la première correspondant au dépôt d'hiver (mort du plancton), et la seconde à l'apport fluvial printanier. Un tel exemple méritait d'être signalé, son intérêt est très grand et sans doute l'interprétation est-elle judicieuse.

Les océanographes du « Meteor » ont donné aussi des exemples de sédiments marins feuilletés : vase bleue surmontant des boues à Globigérines, boues à Globigérines surmontant de l'argile rouge, etc... (*in* X. ANDRÉE [1920]).

Il ne m'a jamais été permis de constater des faits analogues dans les dépôts fluvio-marins que j'ai pu étudier, et l'on peut dire que les vases de la slikke, dans presque tous les cas, sont non feuilletées et qu'elles ne présentent pas de plan de discontinuité : ceci est très normal, car leur dépôt est régulier et continu.

Comment peut-on définir les caractères des dépôts actuels d'estuaire assez nettement pour que l'on puisse parler de faciès ?

Tout d'abord, il n'y a pas qu'un seul type de sédiment d'estuaire. A l'échelle qui est intéressante, ici, on se contentera de deux types : les sables et la vase (ou vase sableuse).

Sables et vases se trouvent juxtaposés dans les estuaires et, parfois, superposés. Une disposition qui est fréquente est celle du chenal sableux bordé de rives vaseuses. Une telle disposition peut donc éviter une confusion toujours possible avec les dépôts de plage, ou tout au moins littoraux. Je ne dis pas qu'il ne puisse pas y avoir phénomène de convergence, mais il y a tout de même beaucoup de chance pour qu'il s'agisse d'estuaire, d'autant plus que si ce dernier est de proportion suffisamment grande, les sables peuvent se grouper en bancs allongés suivant une direction privilégiée qui est celle du chenal.

La puissance des sédiments d'estuaire est assez variable et assez peu connue. Mais on verra, dans le prochain chapitre, qu'en ce qui concerne les estuaires actuels, les sondages ont révélé des épaisseurs de sédiments (allant du sable à la vase) de l'ordre de 20 à 30 m. Il est bien entendu qu'à d'autres époques géologiques, pendant une lente transgression (ou subsidence ?), des sédiments du type vase ont pu s'accumuler sur des épaisseurs bien plus considérables.

En règle générale, les sédiments d'estuaire ne sont pas stratifiés. Les restes et squelettes de la faune actuelle, caractéristiques des sédiments d'estuaire, sont très pauvres : les « fossiles » caractéristiques sont rares. Comme tout à fait typique, on peut citer : *Scrobicularia piperata*, *Mya arenaria*; des traces d'Annélides polychètes. Comme flore, quelques espèces de Diatomées, spécifiques du milieu fluvio-marin et des vases, et des algues marines qui ne sont pas spécifiques des estuaires. A cette vie, particulièrement peu abondante, se surajoute un grand nombre d'espèces marines plus ou moins adaptées aux variations physicochimiques du milieu, et nombre d'espèces planctoniques qui, par collage lors de la marée descendante, s'intègrent aux sédiments de la slikke.

Enfin, aussi, mais assez rarement, quelques espèces terrestres, et notamment des Gastéropodes du genre *Helix* entraînés par les eaux de ruissellement (Bou-Regreg).

Dans l'ensemble, la faune et la flore des sédiments d'estuaire peuvent être définies comme une association d'espèces spécifiquement fluvio-marines (très rares), d'espèces marines (surtout de micro-organismes du plancton) et de quelques rares espèces terrestres. Et, en supplément (si la géologie, du bassin versant comprend des roches sédimentaires à microfossiles), des microorganismes (Foraminifères, Spicules d'Eponge, Diatomées, etc...), plus anciens, ce qui augmente encore la confusion.

## 2. — Sédiments d'estuaire et sédiments marins.

On peut se demander maintenant ce qui différencie ces caractères de ceux des sédiments marins littoraux. Tout d'abord, comme on l'a dit, les vases d'estuaire se trouvent réparties bien au delà de l'estuaire proprement dit : leur extension considérable le long de la côte de Guinée, le long du littoral français, entre l'estuaire de la Loire et celui de la Gironde, etc..., montrent qu'on peut retrouver des sédiments, au large, identiques à ceux d'estuaire. Pour les sables, le problème est encore plus difficile : on peut certes, à l'heure actuelle, en utilisant à la fois la méthode granulométrique, l'analyse des minéraux lourds et l'analyse morphoscopique de A. CAILLEUX, tenter de déterminer les caractères spécifiques des sables d'un estuaire : usure, proportion de grains émoussés luisants et non usés. Mais, pour cela, il est nécessaire et de comparer ces sables à ceux du littoral et du plateau continental avoisinants et à ceux, fluviaux, du bassin du fleuve.

S'il s'agit d'une formation géologique, le problème est beaucoup plus délicat, car il n'est pas possible, la plupart du temps, de retrouver les gisements marins et fluviaux.

On peut dire que, dans la majorité des cas, même en ce qui concerne l'époque actuelle, il est impossible de distinguer d'une façon rigoureuse les vases d'estuaire des vases marines littorales (qui sont d'ailleurs d'origine fluvio-marine), et les sables d'estuaire des sables marins, à moins naturellement de faire une étude locale de l'estuaire et de ses lieux d'alimentation.

On peut même pousser plus loin la comparaison des vases d'estuaire avec les vases

nettement marines (vases bleues de MURRAY et RENARD). Il semble, comme on l'a vu, que l'identité est frappante. Il n'y a plus identité, bien entendu, quand il s'agit de leur extension géographique; mais il peut cependant y avoir confusion, même de ce point de vue, avec les grandes étendues de vases guinéennes ou charentaises. Ainsi, même la profondeur à laquelle s'est fait un dépôt de vase reste ignorée. Evidemment, on ne trouvera pas dans les vases bleues des coquilles de Lamellibranches du type des Scrobiculaires, mais la microfaune et la microflore seront, à peu de chose près, identiques, puisqu'il s'agit de cadavres planctoniques.

D'un autre côté, on se trouve également embarrassé quand il s'agit de faire une discrimination rigoureuse entre les dépôts d'estuaire et les dépôts lagunaires. On sait, en effet, qu'une lagune constitue un milieu dessalé ou un milieu sursalé. La différenciation d'avec un estuaire est très difficile. C'est ce qui se passe pour les embouchures des fleuves de la Mer Noire (bien qu'encore je ferai personnellement une réserve, car la Mer Noire n'étant pas une mer à marée, le terme d'estuaire me paraît impropre). Toujours est-il que les vases de ces limons sont des vases en tous points analogues à celles des estuaires bretons, d'après ce qu'on peut en juger selon les travaux des auteurs russes. Quant aux lagunes qui ne sont pas alimentées en eau douce et qui sont plutôt des étangs en communication avec la mer, tel l'étang de Thau en Méditerranée, les vases étudiées par SUDRY (1911) et par C. LALOU (1) sont très semblables, par leur constitution, aux vases d'estuaire.

C'est donc un fait général, que JACQUES BOURCART et moi-même avons déjà signalé (1942) : que les vases, quelle qu'en soit l'origine : lacustre, lagunaire, océanique, littorale, d'estuaire, se ressemblent beaucoup. En ce qui concerne les vases d'eau douce, il n'y a pourtant pas de confusion possible, grâce à la microfaune et à la microflore, et aussi à la faune macroscopique; mais, pour les autres, il n'existe pas de critère absolu à l'exception des espèces comme les *Myes* et les *Scrobiculaires*.

Il se trouve donc qu'on doit parler avec beaucoup de réserve, à l'heure actuelle, d'un faciès typique de la vase d'estuaire.

### 3. — Vase et argile.

Bien que cette question soit un peu en dehors du sujet, c'est peut-être le moment de se demander comment se forment et où se déposent les argiles, c'est-à-dire les sédiments constitués de silicates d'alumine (de fer et de magnésie). C'est un problème qui, du point de vue géologique, a une immense importance et, pourtant, je ne connais pas de travaux le concernant. C'est peut-être parce que les buts des océanographes et des géologues sont différents. Les premiers recueillent et étudient les sédiments actuels sans leur chercher leurs équivalents passés. Les seconds assimilent aux roches (comme l'argile) des dépôts marins actuels qu'ils n'ont pas étudiés et que, cependant, ils trouvent équivalents à cause d'un aspect macroscopique assez voisin.

Je pense qu'il est inutile de citer la multitude d'auteurs qui ont tranquillement considéré les vases actuelles (littorales ou océaniques) comme étant des argiles. Cette

(1) Résultats non encore publiés.

affirmation, sans aucune étude de détail, était très commode, car elle permettait de retrouver, à l'heure actuelle, des faciès anciens, littoraux ou profonds.

Mais, je pense l'avoir montré, les vases ne sont pas des argiles, mais un sable ou une poussière quartzeuse (ou calcaire) agglomérée, liée par les colloïdes humiques et de fer, sans oublier, vraisemblablement, une certaine proportion, très faible, des minéraux de l'argile, très difficiles à repérer, même par les rayons X.

Si, donc, les vases ne sont pas des argiles, où sont les argiles ? Il existe bien l'argile rouge des grands fonds qui est un sédiment composé de silicates d'alumine de fer, ainsi que MURRAY et RENARD l'ont indiqué. Cette argile couvre de vastes surfaces de fonds océaniques (environ 60 % de la superficie totale), mais elle ne se rencontre qu'aux profondeurs dépassant 4.000 m. Comme MURRAY et RENARD l'ont montré, cette argile est le résultat de la décomposition des roches de différentes constitutions qui recouvrent le fond des océans et qui, pour la plupart, proviennent des volcans sous-marins.

Mais cela ne donne toujours pas l'explication d'argiles bathyales et littorales.

Les argiles sont habituellement considérées comme des roches sédimentaires détritiques, provenant de l'accumulation et de la sédimentation des minéraux de l'argile, qui eux-mêmes résultent, initialement, de la décomposition, par l'eau, des silicates des roches éruptives. Mais il est évident, *a priori*, que l'attaque par l'érosion des eaux courantes des argiles sédimentaires est également une source pour la formation des argiles actuelles; tout comme les sables proviennent, d'une part, du quartz des granites actuellement décomposés et, d'autre part, des sables et des grès préexistants. Initialement, dans les deux cas, ce sont les roches éruptives qui sont productrices des sables et des argiles. A l'heure actuelle, on peut penser que les argiles ne sont transportées par le fleuve qu'en quantité infime. Cette quantité d'argile doit se déposer en même temps que les autres constituants des vases, mais elle est en proportion insuffisante pour qu'elle apparaisse nettement. Au contraire, en supposant des périodes d'activité orogénique (soulèvement), l'érosion fluviale intense attaque et le fleuve transporte de beaucoup plus grandes quantités d'argiles qui se déposent en mer par gravité, quand les sables se sont déjà déposés. Quand on pense par ailleurs que les massifs de roches éruptives ont une extension géographique infime, par rapport à celle qu'ils avaient au Primaire, on peut imaginer comment les argiles ont pu se former et se déposer dans les mers de ces époques géologiques anciennes (Secondaire, Tertiaire).

Enfin, PIERRE URBAIN (1942) pense que les minéraux de l'argile pourraient théoriquement se former à partir des éléments initiaux contenus dans l'eau de mer, pourvu que certaines conditions physicochimiques du milieu soient réalisées. Il y a donc là une nouvelle origine possible des argiles sédimentaires.

Les affleurements de roches argileuses sédimentaires, de tout âge, sont nombreux. Souvent, à une détermination macroscopique du géologue, s'ajoutent les observations plus sûres du pétrographe, ou les analyses physiques (rayons X, analyse thermique différentielle) des physiciens.

Dans tous ces cas, on est vraiment sûr d'avoir affaire à de vraies argiles. Mais ne peut-on penser qu'un certain nombre de roches, ayant l'aspect d'argile, ont été trop rapidement déterminées comme telles et que, peut-être, comme cela a été le cas pour les dépôts récents du type du bri (argile à Scrobiculaires de J. WELSCH), il y a lieu d'examiner de plus près ces roches sédimentaires qui, après tout, pourraient n'être que des vases.

#### 4. — Les estuaires fossiles et les équivalents géologiques de la vase.

Puisque l'argile n'est pas l'équivalent de la vase, il faut tenter de le retrouver dans d'autres formations sédimentaires.

Auparavant, il serait intéressant de rechercher, parmi les descriptions des géologues, une forme fossile qui représente, à leurs yeux, un estuaire. Devant l'impossibilité qu'il y a à connaître toute la littérature géologique, j'ai interrogé à ce sujet un certain nombre de géologues dont l'érudition obviait à mon manque de connaissances. Je n'ai reçu qu'un petit nombre de réponses, et certaines d'entre elles assez confuses. La plupart du temps, il m'a semblé que l'on ne distinguait pas très bien entre estuaire et delta. Ces deux formes d'embouchures sont caractérisées, aux yeux des géologues, par l'existence d'un milieu fluvio-marin fossile, c'est-à-dire par des sédiments où se trouvent, côte à côte, des espèces d'eau douce et marines. Par ailleurs, les sédiments sont plus ou moins grossiers, plus ou moins fins et on parle souvent de stratification entrecroisée correspondant aux différents régimes du fleuve. Avec ces seuls caractères, il ne me semble pas possible d'envisager un estuaire fossile, mais à la rigueur seulement un delta, qui, somme toute, est très différent de l'estuaire, car si ce dernier est dû à l'ingression de la mer dans le bas cours d'un fleuve, le delta réalise exactement l'opposé : c'est le fleuve qui tend à empiéter sur le domaine maritime. La thèse de G. LUCAS (1942) offre un grand caractère d'originalité (puisque l'auteur cherche, après chaque description stratigraphique, et pétrographique, à dégager les conditions océanographiques au moment du dépôt de la formation étudiée et à retrouver des équivalents actuels). Mais je n'y ai pas trouvé de description d'un estuaire fossile, ce qui est sans doute normal, puisque la Méditerranée, mer sans marées, n'en possède pas.

Par contre, l'auteur a fait une comparaison entre la plaine alluviale du Gange actuel et une plaine alluviale jurassique (à la frontière algéro-marocaine) où les successions « argiles », sables et marnes, sont identiques.

Les paléontologistes ont caractérisé un certain nombre d'espèces fossiles comme saumâtres. Comme, à l'heure actuelle, les espèces spécifiquement saumâtres sont rares, elles sont également associées à des formes marines ou d'eau douce qui, selon les auteurs, seraient assez caractéristiques par leur nanisme et la minceur de leur test (G. DELPEY [1939]). N. ANDROUSSOF a signalé que les coquilles de *Cardium*, vivant en milieu dessalé ou sursalé, étaient caractéristiques par leur minceur, leur fragilité et leur nanisme. Ces caractères faunistiques, joints à l'aspect détritique des dépôts dans lesquels on les trouve, ont fait penser — et sans doute pas à tort — aux géologues qu'il s'agissait d'estuaires fossiles. C'est ainsi que, par exemple, M. MARLIÈRE (1936) explique le nanisme de la faune albienne (meule de Bracquagnies) par un milieu saumâtre (faciès d'estuaire). Le Gardonien (Cénomanién), dans le Sud de la France, est également considéré comme représentant un faciès saumâtre (dépôts détritiques à débris organiques).

MUNIER-CHALMAS et E. PELLAT (1900) ont décrit, dans le Boulonnais, deux estuaires fossiles. Ils se situeraient dans le Jurassique (Portlandien). Dans l'estuaire de la Pointe aux Oies, on trouverait la succession suivante : dépôts de galets à la base, surmontés d'argiles noirâtres ou bleuâtres avec lits très irréguliers de sables, et par place, des dépôts de lignites (branches et troncs).

Il est assez rare, dans la littérature géologique, de voir ainsi une succession lithologique être rapportée à un estuaire fossile. Mais, en recherchant bien, on retrouverait des descriptions stratigraphiques qui, si elles n'ont pas été rapportées par les auteurs à des formations d'estuaire, n'en sont sans doute pas moins fluvio-marines. J. BOURCART a ainsi décrit, dans sa thèse, des affleurements de Stampien à *Natica crassatina*, lignites et *Potamides*, qui sont comparables aux formations actuelles du poto-poto de Guinée (1).

Les estuaires actuels n'occupent que de très faibles étendues géographiques par rapport au plateau continental, par exemple, et il faut avoir assez de chance pour les retrouver lorsqu'ils sont fossilisés, d'autant plus qu'on peut se demander jusqu'à quel point ils ne disparaissent pas (tout au moins leurs sédiments) lors de brusques périodes transgressives.

Il faudrait, il me semble, pour affirmer avec certitude que l'on a bien affaire à un estuaire fossile, non seulement retrouver des dépôts qui puissent leur être attribués, non seulement une faune « saumâtre », mais encore la forme topographique de la vallée et la répartition des sédiments sur une distance longitudinale bien plus grande que la distance transversale.

Il reste encore à se demander comment peuvent évoluer les sédiments fluvio-marins, et sous quel aspect pétrographique on peut les retrouver dans la série géologique.

1° Pour les sables, le problème ne se pose pas : ou ils resteront des sables, ou ils seront cimentés et deviendront des grès.

2° Pour les vases, le problème est plus complexe. En effet, que va devenir la matière organique ? Elle peut évidemment, par suite d'oxydations très poussées, disparaître complètement. Dans ce cas, la vase n'est plus qu'un sable, ou une poudre très fine, qui peut donner par la suite de fines quartzites ferrugineuses, que l'on peut aussi appeler pélites (J. BOURCART [1942]), ou microgrès (G. LUCAS [1942]).

Mais la matière organique peut demeurer et il faut alors chercher une roche contenant des débris organiques : certaines marnes bariolées (oxyde ferrique) du Keuper pourraient bien être d'anciennes vases, comme l'a suggéré J. BOURCART.

Ne peut-on pas penser également que certains schistes bitumineux puissent représenter les stades avancés de l'évolution de vases fluvio-marines ? Quartz et matière organique s'y trouvent réunis. On sait qu'il y a déjà longtemps que POTONIE a pensé que la matière sapropélique (humus des vases) pouvait être à l'origine des hydrocarbures. Par ailleurs, P. D. TRASK (1931-1932) signalait aussi que les vases pouvaient être considérées comme roches mères du pétrole.

Dans un article de 1931, E. CHABANIER écrit que la fermentation pétroligène doit son caractère spécial aux eaux saumâtres. La réaction pétroligène a dû, pour être possible dans certains cas, avoir affaire à des matériaux au moins cellulotiques. Ces matériaux ont dû être immergés et être soustraits à l'action de l'air le plus complètement possible ; pour réaliser des conditions anaérobies, le milieu doit être alcalin. Voilà des conditions qui sont réalisées dans les estuaires (matériel organique, anaérobiose, immersion, pH alcalin).

De là à affirmer que les vases d'estuaire sont les roches mères du pétrole, il y a un

(1) Renseignement oral de E. DE CHÉTELAT et de M. NICKLÈS.

pas que je ne ferai certes pas pour le moment. Mais il était intéressant de signaler cette possibilité.

En réalité, il faut bien souligner l'ignorance dans laquelle on se trouve, à l'heure actuelle, pour retrouver, dans les roches sédimentaires des époques géologiques anciennes, les équivalents exacts des vases fluvio-marines. Mais cette étude aura tout au moins montré qu'il ne faut plus maintenant rechercher du côté des argiles, mais bien plus vers les grès fins et les schistes siliceux ou bitumeux. C'est tout un programme de travail.

### CHAPITRE III. — ESSAI D'HISTOIRE GÉOLOGIQUE SOMMAIRE DES ESTUAIRES

La généralité des estuaires dans l'Atlantique semble, au premier abord, être un argument à l'appui de la théorie de l'eustatisme flandrien.

Les travaux de G. DUBOIS (1924, 1925), sur le Quaternaire du Nord de la France; ceux de E. CHAPUT (1917, 1924) et de G. DENIZOT (1921, 1923, 1935) (Gironde, Loire, Seine), ont établi une chronologie de l'époque flandrienne. Si on s'y rapporte, les estuaires seraient, dans leur forme actuelle, dus à la transgression marine du Flandrien supérieur. Pourtant, on peut concevoir que, dans certains cas, les estuaires soient le résultat de subsidences locales.

On sait que, pour la région flamande, Belgique et Hollande, P. TESCH et CH. STEVENS (1940), ont montré — grâce à de nombreux sondages — que « même en ne remontant qu'au début du glaciaire rissien, la subsidence est restée trop forte pour ne pas l'emporter, en influence, sur tout l'eustatisme ». D'autre part, J. BOURCART (1936, 1938), pour le littoral portugais et marocain, et A. FABRE (1939), pour la côte au sud de la Gironde, ont apporté des preuves de déformations récentes du sol qui peuvent être considérées comme étant les causes des transgressions et régressions. Pour le littoral guinéen, E. DE CHÉTELAT (1938) a, dans sa thèse, donné des arguments géologiques et historiques de submersions et d'émersions dues à des mouvements orogéniques de faible amplitude.

Il est donc possible que la transgression générale flandrienne, qui ne peut être niée, soit due à des déformations de la croûte terrestre.

Les dépôts fluvio-marins des estuaires ont une puissance et une stratigraphie qui varient d'un point à l'autre. Tantôt le fond rocheux, l'autochtone si l'on veut, se rencontre à —10 m., tantôt à —30 m., tantôt à —20 m. On ne possède malheureusement pas, pour tous les estuaires, des sondages qui permettraient d'avoir une idée exacte de l'amplitude de la transgression. On peut cependant, à l'aide des quelques sondages connus, tenter une interprétation. C'est peut-être l'estuaire de la Gironde qui a été le mieux étudié de ce point de vue, et l'ouvrage de A. FABRE (1939), sur les terrains de revêtement du Médoc, est capital. Il ne me semble pas inutile de revenir sur les conclusions auxquelles cet auteur est parvenu. Plus de 100 forages au voisinage de l'estuaire de la Gironde ont toujours montré deux types essentiels de dépôts :

« 1. Des dépôts grossiers à la base : graviers, cailloutis, dont la puissance moyenne est aux environs de 6 m.

« 2. Des « argiles » de comblement, homogènes « dépôts très fins, bleuâtres ou jaunâtres, ayant la composition des vases qui se déposent actuellement dans l'estuaire ». Leur épaisseur varie entre 10 et 20 m. »

Le fond rocheux a été trouvé vers —20 m., dans la région de Bordeaux, et vers —40 m., dans le Bas-Médoc. Selon A. FABRE, ces deux catégories de dépôts correspondent à deux régimes différents de sédimentation : les premiers indiquant les alluvions d'un fleuve actif

n'ayant pas encore atteint son niveau de base; les seconds, un comblement d'un estuaire dont le niveau de base s'est progressivement relevé.

Et l'auteur pose enfin la question essentielle, « de savoir si cette élévation est due à une variation absolue du niveau marin (eustatisme) ou à un abaissement du sol (mouvement positif) ».

| Cotes | Terrains traversés | Sondage 4<br>(Rive gauche) |
|-------|--------------------|----------------------------|
| C.M.  |                    |                            |

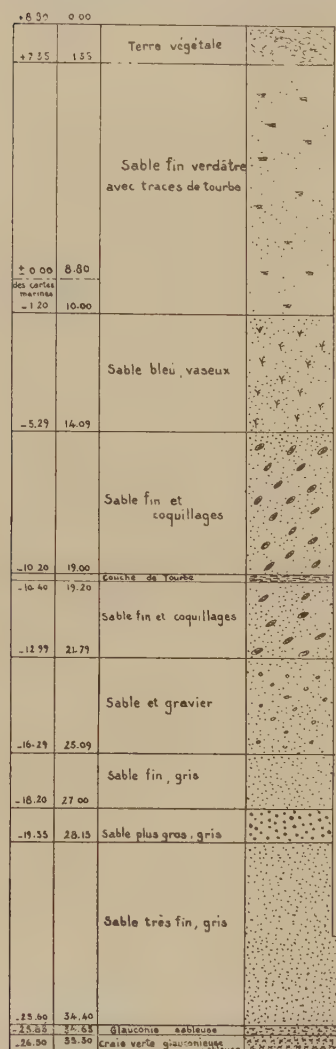


FIG. 85. — Sondage dans l'estuaire de la Seine, à Tancarville (rive droite).

Le Bou-Regreg se termine par un petit estuaire dans lequel quelques sondages ont été effectués. Les résultats de ces derniers ont été exposés par G. LECOINTRE (1926), dans sa thèse sur la Meseta marocaine. Je reproduis ici la coupe que donne cet auteur (p. 81) :

Oued Bou-Regreg : distance de la mer : 4 km. Cote + 2 m. 80;  
alluvions vaseuses jusqu'à -0,55; alternance de sable et de vase marins jusqu'à -15 m.

E. CHAPUT (1924), qui avait étudié les terrasses de la Gironde, avait conclu à des mouvements eustatiques; mais, pour des raisons très précises, appuyées par une argumentation très rigoureuse, A. FABRE montre que la position et la composition des dépôts résultent de la combinaison, variable selon les régions, des mouvements du sol suivants : « abaissement du bassin de l'aval vers l'amont; abaissement général du bassin; déformations dues à des accidents tectoniques locaux ».

Les différents sondages effectués par les Ponts et Chaussées, le long de l'estuaire de la Loire, soit à Saint-Nazaire, soit à Nantes, indiquent un fond rocheux à -30 m. Saint-Nazaire (travaux de DE KERVILER), à -25 m. (Nantes).

Sur ce fond rocheux, on trouve également du cailloutis, puis une grande masse de sédiments vaseux ou vaso-sableux, jusqu'à une altitude supérieure au niveau des plus hautes mers actuelles. G. DENIZOT (1921, 1935), qui a étudié, très en détail, les dépôts quaternaires de la Loire, conclut ainsi à une régression importante qui a permis le creusement dont le lit rocheux de -25-30 m. et les cailloutis de base sont la preuve, puis une transgression lente et progressive a permis le colmatage de l'estuaire par des dépôts fins. Cette transgression (Flandrien supérieur) a même été plus large que l'état actuel le montre, comme le prouvent les dépôts du schorre à une altitude supérieure au niveau des plus hautes mers. Cette transgression a été suivie d'une régression de faible amplitude qui a réalisé le niveau que DENIZOT nomme le Récent et que, d'un point de vue géographique, on appelle le schorre.

A. FABRE, après avoir discuté les notations de la légende de la carte géologique, s'en tient à celle donnée par J. WELSCH (1919), en ce qui concerne les « argiles à Scrobiculaires » qui, dans l'estuaire de la Gironde, constituent les « terrains de palus » et les terrains de « mattes », et qui doivent être rapprochées du Récent de DENIZOT ou du schorre géographique.

L'histoire de l'estuaire de la Seine est à peu près la même : les sondages les plus récents, effectués pour la construction du Pont de Tancarville (fig. 85) indiquent un fond rocheux à -25 m., surmonté d'un lit de cailloutis, puis de dépôts fins, sableux et vaseux. Là aussi, on doit donc envisager le même mouvement d'allées et venues de la mer : régression, transgression et faible régression très récente.

En ce qui concerne les estuaires bretons, tout permet de croire qu'il en est de même. La cote du fond rocheux doit seule changer, mais elle est toujours aux environs de -20, -30 m.

Les autres oueds de la Meseta marocaine, qui, dans leur cours inférieur, sont également submergés, montrent des dépôts analogues que l'auteur caractérise comme marins. Le substratum rocheux est rencontré à des altitudes variables :

- 15 m. pour le Bou-Regreg, à 4 km. de la côte;
- 12 m. pour l'oued Cherrat, à 2 km. de la côte;
- 16 m. pour l'oued Nfikh, à 2 km. de la côte;
- 16 m. pour l'oued Mellah, à 4 km. de la côte.

La faune trouvée dans ces dépôts est marine, mais elle se rencontre également à l'heure actuelle dans les estuaires; certaines espèces sont même caractéristiques des zones fluvio-marines : *Ostrea edulis*, *Cardium edule*, *Scrobicularia plana*, *Solen marginatus*, *Corbula gibba*, *Macra subtruncata*, *Bittium reticulatum*, *Tapes decussatus*.

Notons enfin que, d'après les coupes données par G. LECOINTRE, on ne trouve de la vase que dans les couches supérieures. Les dépôts inférieurs sont très généralement formés de sables grossiers, graviers et même galets; il est donc incontestable que les régimes de sédimentation ne sont pas demeurés constants depuis la transgression initiale.

Les conclusions de G. LECOINTRE sont les suivantes :

« 1. Les estuaires ont été creusés à environ 16 m. plus bas que ne le comporte le niveau actuel, ce qui prouve que la côte a été portée à une altitude supérieure à celle occupée actuellement.

« 2. Les dits estuaires ont été subséquemment envahis par des bras de mer étroits, de petits fjords ou « rias ». Il s'en est suivi un comblement par des dépôts d'origine marine. Il a fallu pour cela un mouvement d'affaissement de la côte.

« 3. Comme nulle part ces dépôts marins n'occupent un niveau supérieur à celui des alluvions actuelles, il faut admettre que le retour de la mer et le remblaiement subséquent ont été déterminés par l'établissement des conditions actuelles d'altitude et non par un enfoncement de la côte au-dessous de sa cote actuelle. »

En un mot, il est fort probable que la « phase négative », pour parler comme les « eustatistes », a été la dernière en date avant l'époque actuelle.

J'ai eu l'occasion d'étudier, à mon tour, l'estuaire du Bou-Regreg, et je pense pouvoir ajouter quelques remarques aux conclusions de G. LECOINTRE.

Tout comme les estuaires précédents, celui du Bou-Regreg possède un schorre formant une basse terrasse au-dessus des dépôts actuels de la slikke. Ces dépôts du « Récent » sont fluvio-marins, comme j'ai pu le constater par la faune qu'ils contiennent (*Scrobicularia*) et aussi par leur identité de constitution chimique et physique, avec les sédiments qui se déposent de nos jours. On pourrait supposer — comme cela se passe pour certains schorres d'estuaires bretons — qu'ils sont contemporains de la slikke, parce que recouverts avec les marées de vives eaux ou les grandes crues. Dans le cas du Bou-Regreg, cette explication n'est même pas valable, car le schorre, dans la partie amont de l'estuaire, n'est jamais submergé : en effet, des fermes ont colonisé ces sédiments qui, maintenant, sont utilisés pour les cultures et l'élevage : ce sont eux qui constituent les «ouldja ». D'autre part, ils forment une terrasse qui surplombe, d'une hauteur variable, la slikke actuelle.

Dans la plupart des estuaires bretons, et aussi dans la Loire, le schorre a une altitude, supérieure de quelques décimètres au niveau des hautes mers moyennes, et cette différence varie peu, ou pas du tout, en allant de l'aval vers l'amont. Au contraire, le schorre du Bou-Regreg s'incline doucement depuis le passage du Sultan, en amont, jusqu'à la Tour Hassan, en aval (à 2 km. de l'embouchure). Au Pont du Chemin de Fer, par exemple, il n'y

a plus de talus séparant le schorre de la slikke, alors qu'il atteint plus de 2 m. près de la Ferme Gibert (voir la carte, p. 152).

Ces faits demandent une explication. Tout d'abord, l'existence d'un schorre dans l'estuaire s'explique bien si on admet qu'une transgression plus large a envahi l'estuaire — et que cette transgression fut suivie d'une régression. C'est le cas que présentent les estuaires du type de l'Aulne, de la Penzé ou de la Loire. Mais il reste encore à expliquer cette diminution d'altitude relative du schorre par rapport à la slikke en allant de l'amont vers l'aval. L'amplitude de la marée, on le sait, est généralement décroissante de l'aval vers l'amont, mais il est des cas, et c'est celui de la Seine ou de la Gironde, — où l'amplitude peut prendre une valeur plus élevée en une zone de l'estuaire située en amont de l'embouchure, par suite de conditions topographiques spéciales qui conditionnent la progression hydrodynamique du flot vers l'amont. Dans ces conditions, il arrive évidemment que le niveau des hautes mers atteigne une cote plus élevée en certains points qu'en d'autres, et que la différence d'altitude entre schorre (s'il existe) et slikke puisse en être d'autant diminuée. Bien que la propagation de l'onde de marée n'ait pas été étudiée en amont de Rabat, dans l'estuaire du Bou-Regreg, ce n'est vraisemblablement pas à une diminution de l'amplitude de la marée qu'est seule imputable cette anomalie d'altitude relative.

Les observations que j'ai pu faire à « Robinson », à 6 km, de l'embouchure, où existe encore un schorre dominant de plus de 1 m. la slikke, et d'autre part à la Tour Hassan, où le schorre prolonge sans talus la slikke, ne m'ont pas montré de différences sensibles dans l'amplitude de la marée en ces deux points.

Il est donc nécessaire de recourir à une autre explication, et on peut la trouver dans une différence d'amplitude du mouvement du littoral (soulèvement) qui a déterminé la régression. On pourrait aussi envisager un commencement de mouvement en sens inverse (affaissement) dont résulterait un nouveau stade régressif.

A. RIVIÈRE (1936), dans son étude sur le traict du Croisic, a signalé une topographie sensiblement analogue : le schorre serait actuellement en recul, par suite d'un actuel mouvement transgressif de la mer.

Le littoral typiquement fluvio-marin de la côte de la Guinée française a fait l'objet des discussions de MACHAT (1906), puis d'observations de M. MOITY (1938), d'E. DE CHÉTELAT (1938), d'E. F. GAUTIER (1935). Tous sont d'accord (les cartes topographiques sont d'ailleurs très parlantes) pour y voir une côte « de submersion », une côte à rias. Mais ici l'extension des dépôts vaseux fluvio-marins dépasse largement le cadre même des estuaires et s'étale tout le long de la côte. Seuls quelques pointements rocheux (Presqu'île de Conakry, Cap Verga) crèvent ces alluvions continues.

En Guinée, comme partout ailleurs, ces dépôts s'étagent en schorre et slikke. Le schorre est situé à une altitude telle qu'il n'est pas atteint par les hautes mers : il faut donc admettre ici aussi que la mer, après une transgression plus ample, a régressé. Régression permettant l'émersion continue du schorre et son découpage en îlots frangeants par une multitude de canaux entretenus par les courants de marée. Mais il semble que de nouveau la mer gagne du terrain, ainsi qu'E. DE CHÉTEAT a pu l'observer en plusieurs points du littoral guinéen (1938). Comment interpréter encore une fois ces mouvements d'allées et venues ? Il s'agit sans doute de mouvements du sol qui ont déterminé d'une part, une large transgression marine (on retrouve sous le manteau d'alluvions fluvio-marines, et, plus au large, affleurant sur la plate-forme continentale, de la latérite, formation essentiellement continentale et récente), et, d'autre part, dans l'arrière-pays, un soulèvement (particulièrement de la pénéplaine de Youkounkoun) ; un faible mouvement en sens inverse a permis l'exondation du schorre, tandis qu'à l'heure actuelle se dessine de nouveau un mouvement transgressif de la mer.

De tels exemples pourraient être multipliés, mais ceux qui ont été examinés doivent suffire pour interpréter les phénomènes qui ont déterminé les estuaires dans leur état actuel.

Les faits peuvent se résumer ainsi :

1. — Existence du fond rocheux des estuaires à des cotes négatives variables d'un point à l'autre du littoral de la Manche et de l'Atlantique (—15 m. dans le Bou-Rregreg, —25 dans la Seine, —30 dans la Loire, —40 à —20 dans la Gironde, etc...).

On peut donc en déduire la preuve d'une régression d'importance variable, mais se retrouvant partout. Un argument corrélatif de ce fond rocheux à une cote négative est

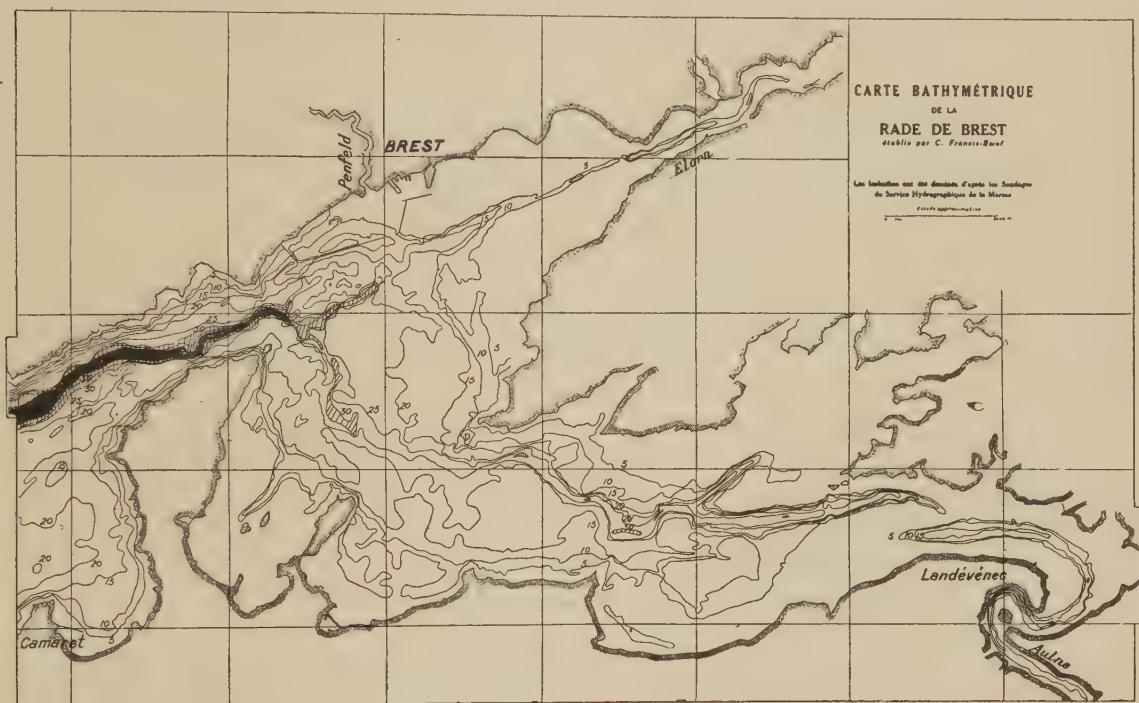


FIG. 86. — Carte bathymétrique de la rade de Brest (vallées sous-marines de l'Aulne et de l'Elorn).

l'existence de vallées sous-marines prolongeant la plupart, pour ne pas dire la totalité, des cours d'eau actuels.

J'ai, par ailleurs, exposé (1938) les faits et les hypothèses émises par de nombreux auteurs français et étrangers. Je ne reviendrai donc pas sur le problème des vallées sous-marines en général. Je ne considérerai ici que les dépressions sous-marines, facilement cartographiables et qui prolongent les cours d'eau sur le plateau continental, à des distances plus ou moins grandes du littoral actuel. R. COLLIN (1923, 1934) a publié toute une série de notes, où il décrit la plupart des vallées sous-marines continuatrices des rivières bretonnes. J'ai moi-même donné une carte bathymétrique de la prolongation de la vallée de l'Aulne et de celle de l'Elorn (fig. 86) : on y retrouve même le méandre terminal de l'Aulne signalé depuis longtemps par E. DE MARTONNE (1906). Cette carte — et ses semblables pour les autres rivières — permet de voir ainsi la continuation sous la mer

de ce lit rocheux que l'on retrouve aujourd'hui à des cotes négatives dans les estuaires.

L'existence d'une plus grande extension continentale, avant la grande transgression flandrienne supérieure de Dubois, est donc un fait bien établi.

2. — Existence d'une transgression d'assez grande amplitude qui a submergé les cours inférieurs des fleuves et a déterminé, dans les estuaires actuels, un remblaiement important (plusieurs dizaines de mètres de sédiments). Cette transgression et le remblaiement consécutif ont dû être progressifs, car on retrouve non seulement de la vase, mais encore très souvent, au-dessus d'un lit de cailloutis, des dépôts sableux, ce qui tiendrait à prouver que le régime hydrodynamique de l'estuaire a varié, entraînant une variété dans les phénomènes de sédimentation. Pourtant, presque toujours ce cycle de sédimentation s'est terminé par une phase vaseuse, que l'on retrouve à peu près dans tous les estuaires au sommet des dépôts.

Enfin, du point de vue de ses limites géographiques, on peut penser avec vraisemblance que les hautes mers atteignaient les rives rocheuses des estuaires actuels. Par contre, vers l'amont, il est plus difficile de dire jusqu'à quel point cette transgression s'est fait sentir, les sédiments témoins faisant souvent défaut.

3. — Existence d'une régression de faible amplitude, qui dans l'ensemble nous conduit au stade actuel et qui a permis l'exondation du schorre (Récent de DENIZOT) formé d'alluvions fluvio-marines constituant une terrasse au-dessus des dépôts actuels de la slikke.

4. — Enfin, dans certains cas peut-être, une nouvelle période transgressive qui sape peu à peu les zones d'extension du schorre (exemple du traict du Croisic donné par A. RIVIÈRE), mais que l'on a peine à déceler dans les estuaires.

Tels sont les mouvements d'avancées et de retraits de la mer, qui ont déterminé les formes topographiques et morphologiques des estuaires actuels. Tout ceci date du Quaternaire récent et il est vraisemblable de penser que, dans certains cas, les hommes de l'âge du bronze, et même sans doute de l'époque gallo-romaine, ont été les témoins de la transgression, ainsi que tendent à le montrer les découvertes, à Saint-Nazaire, par exemple, de DE KERVILER (1892). Il va sans dire que les conclusions de cet auteur concernant le dépôt annuel des couches de vase doivent être considérées avec beaucoup de réserves. Ce que l'on sait sur les vitesses d'envasement des estuaires est très fragmentaire et assez contradictoire. Ces vitesses d'envasement dépendent essentiellement, en effet, des conditions topographiques préexistantes qui, à leur tour, conditionnent le régime hydrodynamique de l'écoulement; on a pu voir ainsi des envasements de plusieurs mètres en l'espace d'un an (digue de la rive droite de l'estuaire de la Seine entre Tancarville et le Havre) et, par contre, des zones où l'envasement annuel est insignifiant.

On peut aussi se demander à quels phénomènes on doit attribuer ces transgressions et régressions. Les auteurs qui ont établi la chronologie du Quaternaire voudraient voir, dans ces avancées et ces retraits généralisés tout le long du littoral de la Manche et de l'Atlantique, une preuve d'eustatisme, c'est-à-dire un mouvement relatif de l'Océan par rapport au continent, ce dernier demeurant fixe (DUBOIS).

Les épirogénistes pensent, au contraire, que c'est à des mouvements du continent, dans un sens positif ou négatif, que sont dues transgressions et régressions (HAUG). Mais, chose curieuse, on a l'impression qu'ils limitent le continent à la falaise vive ou à la plage et que, par consé-

quent, la partie émergée du continent est une partie distincte du plateau continental et, d'une façon plus générale, de toute la partie continentale submergée.

L'eustatisme, dans le cas précis qui nous intéresse, rend compte de la généralité des mouvements transgressifs et régressifs. L'épirogénie peut, par contre, expliquer — ce que ne fait pas l'eustatisme — les variations d'amplitude de ces mouvements avec les différents estuaires considérés. L'un et l'autre, cependant, semblent en défaut pour rendre compte de deux phénomènes qui, à première vue, sont incompatibles : en effet, en Bretagne et au Maroc (Meseta), toutes les rivières ont été submergées dans leur cours inférieur, tandis qu'une active reprise d'érosion avait lieu dans le haut cours. Selon le schéma classique des géographes, une reprise d'érosion ne peut avoir lieu qu'en deux circonstances :

— ou il y a régression marine (eustatisme) et, dans ce cas, le fleuve cherche, en creusant plus vigoureusement, à rétablir ou à tendre vers son profil d'équilibre ;

— ou il y a soulèvement continental et, encore cette fois, creusement plus intense sur place, pouvant aller jusqu'à réaliser des gorges épigéniques. Dans le cas de soulèvement, la conséquence immédiate doit être un mouvement régressif de la mer.

Dans l'une et l'autre de ces hypothèses, il ne peut y avoir place à la fois pour une transgression en aval est une reprise d'érosion en amont. C'est alors que l'on peut faire appel à une troisième hypothèse explicative, qui a tout au moins le mérite de rendre compte de ces apparentes oppositions et qui est aussi « générale » que les deux premières. Elle est due à J. BOURCART (1938). Cet auteur fait tout d'abord ressortir ce fait essentiel : *le continent émergé et la surface submergée sont en parfaite continuité*. La surface enveloppante du continent sous-marin et émergé dessine dans l'ensemble un pli synclinal (fond océanique) et un pli anticlinal (zone continentale émergée). Synclinal et anticlinal doivent être pris dans un sens très général et concernent de grandes étendues (géographiques). Le passage de la zone anticlinale à la zone synclinale a lieu par une flexure, dénommée par l'auteur « flexure continentale ». Le niveau de la mer par rapport au point d'inflexion, à une époque donnée, varie avec les lieux géographiques considérés.

Si, maintenant, on suppose que pour une raison (aussi inconnue que celles qui déterminent les mouvements eustatiques ou épirogéniques) la flexure continentale s'accroît (soulèvement du côté anticlinal, affaissement compensateur de la zone synclinale), ou au contraire qu'elle se rapproche de l'horizontalité (mouvement inverse du cas précédent), le niveau marin changera de position. Un très grand nombre de combinaisons peuvent être envisagées par rapport à un stade initial : le niveau marin peut, à un certain stade, correspondre exactement au point d'inflexion ; il peut aussi être dans la partie synclinale ou dans la zone anticlinale.

Par la suite, des mouvements peuvent avoir lieu soit dans un sens positif (gonflement de la zone anticlinale, affaissement de la zone synclinale), soit dans un sens négatif et entraîner alors une modification du niveau marin par rapport au continent primitivement émergé, soit dans un sens transgressif, soit dans un sens régressif suivant la position de départ eu égard au point d'inflexion.

Le cas des rivières bretonnes et marocaines (Bou-Regreg) peut alors s'expliquer suivant un schéma hypothétique :

Stade de départ = stade de régression (vallées sous-marines et cotes négatives du fond rocheux des estuaires) : le niveau marin est nettement situé en-dessus du point d'inflexion (zone anticlinale).

Mouvement positif de la zone anticlinale, mouvement négatif de la zone synclinale. Conséquences : la flexure continentale s'accroît ; le niveau de la mer s'élève par rapport au niveau précédent ; le bas cours du fleuve est envahi par la mer ; le haut bassin du fleuve est relevé : il y a donc reprise d'érosion.

Ce cycle conduit au stade de la plus grande extension de la transgression.

Cycle inverse du précédent, mais de très faible amplitude : exondation du schorre.

De nouveau, commencement d'un cycle transgressif (?).

Ainsi, ce que l'on peut appeler l'hypothèse de la flexure continentale est tout aussi générale que celle de l'eustatisme, la seule qui ait été jusqu'à ce jour vraiment formulée.

Elle offre en outre plusieurs avantages et, entre autres, ceux d'expliquer : 1° les anomalies apparentes que constitue une transgression dans la partie aval, et une reprise d'érosion dans la partie amont d'un cours d'eau; 2° les différences de cote du lit rocheux entre les différents estuaires, les différences d'amplitude de la transgression, les différences d'altitude relative entre schorre et slikke pour plusieurs estuaires considérés; 3° enfin, les déformations possibles que le schorre a subi et qui se traduisent, sous nos yeux, par une pente difficilement explicable autrement (Bou-Regreg).

Les périodes de soulèvement (tuméfaction de J. BOURCART) et d'affaissement entraînant soit une régression, soit une transgression, sont remarquablement simultanées pour toutes les parties du monde, ainsi que l'a montré l'auteur. Il en est de même pour l'époque du Quaternaire récent, qui nous intéresse ici, et je ne veux pour preuve que la généralité des estuaires et de leur schorre le long du littoral atlantique.

CH. STEVENS (1940) signale que, pour le littoral belge et hollandais, des subsidences locales ont joué un rôle plus important que les variations du niveau marin dues aux glaciations quaternaires.

On peut, partant de cette idée de subsidence introduite dans le langage géologique français par P. PRUVOST (1930), se demander si ce phénomène ne joue pas un rôle — difficilement décelable d'ailleurs — dans l'accumulation, dans les estuaires, de dépôts de plusieurs dizaines de mètres de puissance, gardant très souvent un faciès identique sur toute leur épaisseur.

De ce fait, la transgression flandrienne — et la sédimentation consécutive — prendrait une physionomie toute différente. Mais comme, au phénomène de subsidence, il faut une cause et que jusqu'ici les géologues ne sont guère d'accord, on retombe sur le même problème des causes des transgressions et des régressions, et rien n'empêche de voir, dans la subsidence, une manifestation des mouvements orogéniques (flexure continentale de J. BOURCART).

Je me rangerai, en guise de conclusion, à l'avis de A. FABRE (1939), fougueux anti-eustaticien : « Il n'y a aucune raison pour chercher à expliquer des phénomènes proches de nous (dans le temps et dans l'espace) par des causes qui séparent l'histoire géologique du Quaternaire des époques plus anciennes, où l'on admet très généralement que transgressions et régressions sont les conséquences de mouvements du sol. »

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Jusqu'à ce jour, il ne semble pas qu'il y ait eu de travaux d'ensemble concernant le milieu fluvio-marin et les dépôts d'estuaire. Il ne faut toutefois pas oublier les notes ou les mémoires contenant des indications sur les variations physicochimiques dans les estuaires, publiés par des biologistes français et étrangers, et surtout les fascicules résultant de la surveillance de l'estuaire de la Tees.

Mais ces questions n'avaient pas été envisagées par les géologues et les géographes avant les recherches de J. BOURCART, de B. RAJČEVIĆ et de moi-même. Dans le travail présenté ici, on a largement tenu compte de tous les résultats obtenus dans tous les domaines qui touchent de loin ou de près au milieu fluvio-marin et aux dépôts d'estuaire; ils ont été rapprochés des nôtres et une vue d'ensemble sur ces phénomènes naturels a été tentée.

Il est bon, je crois, de résumer aussi brièvement que possible, et sous forme de proposi-

tions, les recherches qui ont fait l'objet de ce travail et les conclusions qui ont pu en être déduites. Les estuaires étudiés personnellement par l'auteur sont, en Bretagne : la Penzé et l'Aulne, et de nombreux autres à titre de comparaison; la Loire et le Bou-Regreg marocain.

1. — Le terme d'estuaire a été défini comme étant le cours inférieur de fleuves, remontés sur une certaine distance par le flot périodique de la marée.

2. — Par suite de la marée, il faut distinguer les rivages de basse mer, constitués par les dépôts vaseux actuels de la slikke, et les rivages de haute mer, constitués par les dépôts plus anciens de vase (talus du schorre) ou la roche des versants.

3. — Un bref aperçu hydrodynamique, où le jeu des courants de marée (flot et jusant) et leurs caractéristiques sont mis en valeur : le retard progressif de l'onde de marée, à mesure qu'elle progresse dans l'estuaire, et la prépondérance, dans le temps, du jusant sur le flot. La vitesse du courant de flot est maximum à environ 3 m. de profondeur et décroît ensuite jusqu'au fond. En moyenne, le flot se fait sentir plus longtemps au fond qu'en surface et c'est l'inverse pour le jusant.

L'évacuation d'une particule, depuis l'extrême point amont de l'estuaire jusqu'en mer, peut donc se faire en deux marées pour un estuaire du type de l'Aulne, tandis que la trajectoire résultante d'une particule au fond est en moyenne dirigée de la mer vers l'amont.

La vitesse des courants de marée est nulle aux étales et croît pendant les trois premières heures de la marée (de l'ordre de 1 m.-sec.), puis décroît pour s'annuler à la nouvelle étale.

Les courants de marée sont turbulents par suite de l'existence de tourbillons à axe horizontal et à axe vertical.

4. — Le régime des températures. En hiver (latitudes tempérées) : les eaux fluviales sont toujours plus froides que les eaux marines. La température des eaux d'estuaire est intermédiaire et varie avec le rapport des volumes eau douce/eau de mer, avec, en général, une stratification thermique inverse. En été, tantôt les eaux fluviales sont plus chaudes, tantôt plus froides que les eaux marines, mais il semble que les eaux emmagasinées dans l'estuaire se réchauffent pendant le jour et aient, de ce fait, une température plus élevée que l'eau la plus chaude.

Où il n'y a pas de stratification (l'eau de surface a la même température que l'eau de fond), ou il y a stratification thermique normale.

La connaissance du régime des températures a donc un intérêt : biologique (migrations) et physique (coefficient de viscosité, densité : facilité ou non facilité de mélange).

5. — Le régime et les variations de salinité. La salinité des eaux en un point d'estuaire dépend : du débit fluvial, longue période de variation (mois); du coefficient de marée, période de l'ordre de la durée de marée (heures); de la distance comptée à partir de l'embouchure; de la profondeur; du vent; de l'heure de la marée, période de variations très variable (instantanée, heures, jours).

C'est le jeu de ces différents facteurs qui détermine, en un point, le degré de salinité observé. C'est ainsi que l'eau de mer pénètre plus ou moins loin en amont de l'embouchure et que, là même où l'on observe une variation de la hauteur d'eau (marée dynamique), il n'y a pas toujours pénétration d'eau salée (marée physico-chimique).

Il y a donc lieu de distinguer une zone aval où la marée se traduit par des variations de salinité, et une zone amont où la marée est seulement mécanique. L'importance relative de ces deux zones dépend du débit de la rivière et du coefficient de marée. L'extension de ces deux zones dépend surtout de l'époque de l'année (été = étiage, hiver = crues).

Variation de la salinité avec la marée sur une verticale. Plusieurs observations ont été faites qui permettent de dire qu'en été : la salinité minimum s'observe à basse mer, mais le minimum s'étend sur plusieurs heures à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure; la salinité maximum s'observe à haute mer, ou aux heures qui devancent ou suivent immédiatement la haute mer; l'amplitude de variation de la salinité, nulle en mer, augmente progressivement à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure, pour atteindre un maximum qui dépend du coeffi-

cient de marée (amplitude maximum de 15 %, par exemple, à —6 km. en amont de l'embouchure de Bou-Regreg), puis décroît progressivement pour finalement s'annuler. Les eaux profondes (du fond) sont habituellement plus salées que celles de surface; mais la différence, en régime d'étiage, ne dépasse guère 1 ou 2 ‰.

En hiver, on peut noter, d'après les graphiques, des caractères analogues. Mais le fait essentiel est une stratification des eaux par ordre de densité (salinité) tout à fait remarquable. C'est ainsi que, dans l'estuaire de l'Aulne, à Trégarvan, la salinité des eaux de surface variait entre 4,5 ‰ et 1 ‰, tandis que celle des eaux de fond variait entre 29 ‰ et 25 ‰, soit une différence de 24 ‰ entre la surface et le fond.

La construction des courbes isohalines (dans un plan sagittal) aux différentes heures de la marée, a permis (notamment dans l'estuaire du Bou-Regreg), d'étudier la pénétration du flot et l'évacuation du jusant. A partir de ces courbes, on a établi un gradient de salinité :  $G_s = \frac{S-S'}{L}$ , qui permet de comparer, dans une certaine mesure, le flot et le jusant à un phénomène de compression et de détente.

L'existence d'eaux saumâtres dans les estuaires pose le problème du mélange des eaux douces et des eaux salées. Il semble qu'il soit dû à deux séries de phénomènes : 1° phénomènes mécaniques de mélange par les tourbillons qui pulvérisent l'eau en sphères et augmentent les surfaces de contact. En hiver, le mélange est difficile par suite des différences très grandes de salinité et température qui déterminent de grandes différences de viscosité. 2° phénomènes de diffusion des sels de l'eau de mer dans l'eau douce. Mais ils sont très lents et ne jouent un rôle réel que par suite des phénomènes mécaniques.

6. — Le pH des eaux d'estuaire est, en règle générale, toujours alcalin; en hiver, cependant, il peut devenir légèrement acide (6,8); mais il s'agit, dans ce cas, d'eau douce fluviale (Penzé). Le pH varie couramment avec la plus ou moins grande proportion d'eau de mer, et donc, en un point, avec la marée.

7. — La teneur en oxygène dissous n'augmente pas régulièrement de l'eau de mer à l'eau douce, comme on l'a dit parfois. Il semble, au contraire, que les eaux d'estuaire présentent une déficience d'oxygène par rapport à l'eau de mer et par rapport à l'eau douce, fluviale. Il est très difficile d'interpréter les variations locales de la teneur en oxygène dissous : l'action photosynthétique n'apparaît pas aussi nettement qu'en mer. La teneur en suspensions (matières organiques réductrices) est un facteur dont il faut constamment tenir compte.

8. — La teneur en suspensions et la transparence des eaux varient en sens inverse. Les eaux marines sont plus transparentes (faible teneur en suspensions), que les eaux d'estuaire; c'est pourquoi la transparence augmente avec le flot et diminue avec le jusant.

A partir d'une certaine distance de l'embouchure, les eaux marines refoulant les eaux saumâtres très chargées, la transparence diminue avec le flot.

Le stock de matières en suspensions oscille donc avec la marée. Assimilation au « bouchon vaseux » de L. GLANGEAUD. Avec les fortes marées ou des débits fluviaux importants, une partie des matières en suspensions est évacuée en mer.

9. — Les sédiments meubles sont toujours polydispersés. Mais certains peuvent être monophasés, c'est-à-dire formés de grains compris entre deux limites dimensionnelles et jouissant entre ces limites de propriétés physiques et physicochimiques spécifiques. D'où l'adoption de la classification de J. BOURCART: cailloux (> 2 mm.), sables (2 mm. à 0 mm. 02), poudres (< 0 mm. 02), précolloïdes (< 0 mm. 02 > 0 mm. 001) et colloïdes.

10. — Les sédiments monophasés dans les estuaires : 1° les cailloux (galets et graviers) se trouvent à la partie supérieure des rives et sont des produits de désagrégation des versants. 2° Les sables sont répartis surtout dans les chenaux : ils sont essentiellement quartzeux et ont une origine marine et fluviale, ou quelquefois les deux à la fois. L'analyse granulométrique a permis de mettre en évidence ces deux apports dans les sables de l'embouchure du Bou-Regreg.

11. — Les sédiments polyphasés: la vase (sédiment complexe). C'est un sédiment qu'il ne faut pas confondre avec les limons, les boues ou les argiles. La vase est constituée d'une phase sableuse, d'une phase pulvérulente, de colloïdes (matière organique, fer). C'est un dépôt sub-aquatique. Elle constitue un milieu réducteur : couleur noirâtre; teneur en eau élevée; s'oxyde à l'air libre, perd son eau, devient grisâtre ou même jaunâtre; desséchée à l'étuve, a l'aspect très cohérent et homogène; peut donner une cassure presque lithographique.

On peut considérer la vase comme constituée de deux milieux : *milieu liquide*, c'est l'eau d'inclusion : sa teneur est de l'ordre de 100 à 200 %; *milieu solide*, une étude granulométrique de plusieurs échantillons de vase révèle d'assez notables différences : il semble, en attendant que ces coupures soient vérifiées ou modifiées par l'étude de propriétés physiques, que l'on peut classer les vases en trois groupes : groupe où la fraction 0 mm. 05 est  $\geq 90$  %; un groupe où la fraction 0 mm. 05 est comprise entre 90 % et 50 %; un groupe où la fraction 0 mm. 05 est inférieure à 50 %. Après quoi, l'on passe progressivement aux sables vaseux.

Le milieu solide lui-même comprend deux fractions distinctes : une fraction inorganique : sables et poudres minérales = milieu inerte (B. БРАЖНИКОВ), et une fraction active où la matière organique et le fer jouent le rôle essentiel.

Le teneur en matière organique totale des vases est de l'ordre de 8 à 10 %; la teneur en azote total, de l'ordre de 0,15 %. Mais ces valeurs sont très variables non seulement d'un estuaire à l'autre, mais encore entre les différents échantillons d'un même estuaire. La matière organique, surtout d'origine végétale et planctonique, est décomposée par des Bactéries (Waksman) qui la transforment en un complexe assez stable, semble-t-il, l'humus (J. BOURCART et P. PÉREAU).

La teneur en fer total (Fe) est de 3 % environ dans les vases fluvio-marines. Il semble que, pour expliquer une telle teneur, on puisse faire appel à trois processus différents : le fer peut avoir une origine détritique, il peut être dû à une précipitation chimique, enfin il peut être concentré par des Ferrobactéries. Le fer à la surface des vases est oxydé (hydroxydes); en profondeur, en milieu anaérobie, il est réduit par des Bactéries et il se transforme en monosulfure de fer finement divisé (ce qui contribue à donner aux vases leur couleur noire).

Le rapport C/Fe est une donnée intéressante qui semble assez caractéristique pour les vases des estuaires bretons : il est toujours voisin de 1 (1,35 = valeur moyenne).

La vase est un ensemble dont il est intéressant de connaître les échanges avec le milieu extérieur, c'est-à-dire avec l'eau qui la recouvre. C'est ainsi que les vases ont des eaux d'inclusion qui sont plus salées que les eaux recouvrantes. Mais si une vase est recouverte par des eaux moins salées que les eaux d'inclusion, ces dernières cèdent une partie de leurs sels.

Les vases étant imbibées d'eau, on peut parler de leur pH. Celui-ci est toujours alcalin; mais souvent, cependant, il est moins alcalin que les eaux qui recouvrent le sédiment. Les vases consomment de l'oxygène et, à l'obscurité, épuisent rapidement tout l'oxygène qui est à leur disposition.

Les vases constituent un milieu particulièrement réducteur.

Les recherches sur les propriétés physiques des vases, dues à V. ROMANOVSKY et à J. BOURCART, ont montré qu'elles sont : cohérentes, plastiques, rigides thixotropiques, compressibles et non élastiques, pratiquement imperméables et qu'elles possèdent une structure.

Peu d'espèces d'animaux vivent au sein des vases; mais le nombre d'individus est grand. Parmi les plus caractéristiques, il faut citer : *Mya arenaria* et *Scrobicularia piperata*. A la surface de la vase, ou enfouis à très faible profondeur : *Cardium*, *Ostrea*. Parmi les algues, une place à part doit être réservée à *Fucus lutarius* vasicole et aux Entéromorphes. A noter aussi la présence fréquente sur la haute slikke de *Spartina*.

La vie microscopique est plus abondante : il faut distinguer les espèces locales des espèces planctoniques : la microflore est surtout représentée par de très nombreuses Diatomées et des Cyanophycées, sans oublier les Bactéries nombreuses et variées.

La microfaune comprend des larves planctoniques (Trochophores), des Flagellés, et des Foraminifères.

12. — Les vases représentent le dépôt caractéristique des estuaires. Ce sont elles qui forment les slikkes, bancs riverains découvrant à basse mer. Le chenal, par contre, est souvent ensablé. La vase, qui domine dans les estuaires bretons, est un sédiment qui a une extension géographique

considérable: on la trouve dans tous les estuaires du monde et parfois même, dépassant, vers la mer, le cadre restreint des estuaires.

13. — Les vases ne se déposent pas par simple gravité; elles ne sont pas non plus le résultat de la floculation des particules en suspension par les électrolytes de l'eau de mer.

Leur dépôt est dû au jeu alternatif bi-quotidien de la marée, qui permet aux particules en suspension dans l'estuaire d'adhérer aux dépôts préexistants, lorsque la lame d'eau s'annule (phénomènes de surface = attraction pseudocapillaire et adsorption).

Le dépôt des vases dans les estuaires est assimilable au dépôt de la mousse de savon sur les bords d'une baignoire, quand elle se vide.

14. — Quand les vases sont exondées et mises à l'air libre, le faciès de slikke disparaît peu à peu et évolue vers des termes de transformation. Le premier stade d'évolution est le schorre qui se peuple de phanérogames et acquiert une structure grumeleuse qui le rend perméable à l'eau et à l'air, et le dessale progressivement.

Le schorre à son tour évolue peu à peu et devient ce que l'on connaît, dans les pays de la Mer du Nord, sous le nom de polders, et celui de marais maritimes, dans l'Ouest de la France.

15. — Il est assez difficile de définir un faciès typique d'estuaire du point de vue géologique. Le faciès actuel peut être caractérisé par des vases progressivement dessalées et contenant une faune de Scrobiculaires et de Myes, et une assez grande abondance de squelettes d'espèces planctoniques. Les sédiments d'estuaire ne sont généralement pas lités.

Les équivalents géologiques de la vase sont difficiles à retrouver; mais, à l'exclusion des argiles, l'évolution des vases peut, peut-être, aboutir à des grès très fins et ferrugineux (pelites ou microgrès), à des schistes bitumeux. Il est enfin possible que les vases soient une des roches mères du pétrole.

16. — L'histoire géologique des estuaires actuels peut se résumer ainsi :

1° Régression antéflandrienne (cailloutis et sables).

2° Transgression flandrienne (vases).

3° Début de régression post-flandrienne (schorre).

4° Parfois, sans doute, commencement de transgression (sapement du schorre).

Ces mouvements sont vraisemblablement orogéniques.

Jusqu'à présent, les estuaires étaient considérés comme un domaine géographique, où le fleuve et la mer se partageaient l'influence. Il semble que les recherches et les faits que je viens d'exposer montrent que c'est l'influence maritime qui est dominante.

Le milieu aqueux, comme les sédiments, sont soumis au rythme de la marée, à la pénétration de l'eau de mer qui détermine un milieu physicochimique très particulier et très caractéristique. Si le fleuve est la cause initiale de l'estuaire, puisqu'il en a modelé les versants et la forme générale, il s'est effacé devant l'invasion marine et il ne constitue plus qu'un facteur de variation physicochimique et dynamique du milieu.

Milieu fluvio-marin et dépôts d'estuaire constituent bien, à l'heure actuelle, un ensemble géographique et biologique qui ne peut être confondu avec aucun autre.

Le point de départ de ce travail est une étude de géographie physique et je me suis vu entraîné, pour comprendre les phénomènes naturels, à pousser des pointes dans des domaines qui, habituellement, ne sont pas ceux du géographe. Je m'excuse de ces incursions dans des disciplines scientifiques qui ne sont pas les miennes, d'autant plus que l'homogénéité de ce travail en souffre certainement. Je n'espère que deux choses : une grande indulgence de la part des spécialistes, et leur collaboration pour des recherches ultérieures qui préciseront ou détruiront les conclusions provisoires auxquelles j'ai abouti.

## BIBLIOGRAPHIE

1942. ABRARD (R.). — Observations relatives à une nouvelle note de M. DEICHA, sur le Gypse parisien. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 13, p. 153.
1932. ALEXANDER, SOUTHGATE et BASSINDALE. — The salinity of the water retained in the muddy foreshore of an estuary. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, 18, p. 297.
1923. ALLEE (W. C.). — Some physical factors related to the distribution of littoral invertebrates. *Biol. Bull.*, 44, p. 205.
1897. ALLEN (E. J.). — On the fauna and bottom-deposits near the thirty-fathom line from the Eddystone grounds to Start point. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, 5, p. 365.
1900. ALLEN et TODD. — The fauna of the Salcombe estuary. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, VI, p. 151.
1902. — The fauna of the Exe estuary. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, VI, p. 295.
1921. ANDRÉ (G.). — Chimie agricole : chimie du sol, 1 vol., *Bailliére*, Paris.
1920. ANDRÉE (K.). — Geologie des Meeresbodens. II<sup>e</sup> vol., Leipzig.
1933. ANTIPA (GR.). — La vie dans la mer Noire. *Ann. Inst. Océan.*, XIII, p. 53.
1916. APSTEIN (C.). — Bodenuntersuchungen in Ost-und Nordsee. *S. B. Ges. Natur freunde*, Berlin, p. 355.
1922. ATKINS (W. R. G.). — The hydrogen ion concentration of sea water and its biological relations. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, XII, p. 717.
1922. — Respirable organic matter of Sea water. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, XII, p. 772.
1924. — The hydrogen ion concentration of sea water in its relation to photosynthetic changes. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, XIII, p. 437.
1932. — Solar radiation and its transmission through air and water. *Journ. du Conseil pour Explor. de la Mer*, 7, p. 171.
1933. ATKINS (W. R. G.) et POOLE (H. H.). — The Photo-electric measurement of the penetration of light of various Wave lengths into the sea and the physiological bearing of the results. *Phil. trans. Roy. Soc. London*, sér. B., 222, p. 129.
1905. ATTERBERG. — Die rationnelle Klassifikation der Sande und Kiese. Berlin.
1875. AUDOYNAUD (A.). — Recherches sur l'ammoniaque contenue dans les eaux marines et dans celles des marais salants du voisinage de Montpellier. *C. R. Ac. Sc.*, 81, p. 619.
1936. BACHRACH, JULLIEN, LUCCIARDI et RICHARD. — Actions réciproques des Diatomées, des huîtres et du milieu. *Rev. Trav. Off. Pêch. marit.*, IX, 4.
1882. BARROIS (CH.). — Sur les plages soulevées de la côte occidentale du Finistère. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, IX, p. 239.
1896. — Sur la légende de la feuille de Saint-Nazaire. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, XXIV, p. 137.
1896. — Sur l'origine de la Grande Brière. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, XXIII, p. 194.
1897. — Sur les phénomènes littoraux du Morbihan. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, XXIV, p. 182.
1886. BARUS (C.). — Subsidence of fine solid particles in liquids. *Bull. U. S. Geol. Survey*, n° 36, 51 p.
1889. — The subsidence of fine particles in liquids. *Am. Journ. Sc.*, t. 37, p. 122.
1897. BAYFIELD and KELLY. — Travaux sur l'estuaire du Saint-Laurent. « *Sailing Directions* » Toronto.
1914. BEAUCHAMP (P. DE). — Les grèves de Roscoff. 1 vol., *L'homme*, Paris.
1849. BEECHY (J. W.). — Remarks on the tidal phenomena of the river Severn.
1889. BELLEVILLE (M.). — Régime hydraulique de la Seine maritime. *Congr. Internat. des Trav. marit.*, Paris.
1938. BESSE (L.). — Etude expérimentale de la vitesse de chute de parcelles planes en milieux visqueux. *C. R. Ac. Sc.*, 206, p. 1745.
1893. BODLÄNDER. — *Zeit. physik. chem.*, XII, p. 685.
- 1928-1930. BOGUE (R. H.). — Traité de chimie colloïdale. T. I, II, 2 vol., *Hermann*, Paris.
1845. BOUNICEAU (M.). — Etude sur la navigation des rivières à marées. 1 vol. Paris.

1903. BOURCART (E.). — Composition chimique des eaux et des vases des lacs de montagne. *Arch. Sc. Phys. Nat. Genève*, XV, avril.
1936. BOURCART (J.). — Résultats d'ensemble d'une étude du Quaternaire et du Pliocène marin du littoral atlantique du Maroc et du Portugal. *C. R. IV<sup>e</sup> Congrès des Géogr. et Ethnogr. slaves*, Sofia.
1936. — Sur l'évolution du littoral de la Péninsule ibérique, de la presqu'île de Peniche (Portugal) au Cap Finisterre (Galice espagnole). *C. R. Ac. Sc.*, 202, p. 1448.
1937. — Sur la possibilité de déterminer l'origine d'un ensablement par l'étude des courbes de fréquences granulométriques. *C. R. Som. Soc. Géol.*, 4-5, pp. 45-50.
1938. — La marge continentale. Essai sur les régressions et les transgressions. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, VIII (5), pp. 393-474.
1938. — Introduction aux « Etudes potamologiques ». *Rev. géo.-phys. géol. dyn.*, XI, 4.
1939. — Sur l'origine des vasières de la Seine maritime. *C. R. Ac. Sc.*, pp. 758-760.
1939. — Sur les vasières des estuaires de la Manche. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 6, p. 73.
1939. — Essai de définition des vases d'estuaire. *C. R. Ac. Sc.*, 209, p. 542.
1939. BOURCART (J.) et FRANCIS-BŒUF (CL.). — Sur la véritable signification des sables vaseux et des vases sableuses. *C. R. Ac. Sc.*, 209, p. 568.
1940. BOURCART (J.). — L'envasement des ports maritimes. *Ann. Inst. Batim. et T. P.*, 5<sup>e</sup> an., 2, pp. 1-10.
1941. — Essai de définition des vases des eaux douces. *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 448.
1941. — Sur les boues et limons déposés par les cours d'eau. *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 651.
1941. BOURCART (J.), FLORENTIN (J.) et ROMANOVSKY (V.). — Sur un appareil permettant la détermination de la rigidité des suspensions grossières. *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 682.
1941. BOURCART (J.). — Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XI, p. 117.
1941. BOURCART (J.) et PÉREAU (P.). — Sur une méthode de fractionnement du constituant organique des vases. *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 1044.
1941. BOURCART (J.), FRANCIS-BŒUF et RAJČEVIĆ (B.). — Sur le mécanisme de la sédimentation des vases dans les estuaires. *C. R. Ac. Sc.*, 213, p. 1025.
1942. BOURCART (J.). — La vase, milieu biologique. *C. R. Som. Soc. Biogéogr.*, 16 janv., p. 1-4.
1942. BOURCART (J.) et FRANCIS-BŒUF (CL.). — La vase, 1 vol., *Actual. scient., Hermann*.
1931. BOUTARIC (A.). — Les colloïdes et l'état colloïdal. 1 vol., *F. Alcan*, Paris.
1937. — Recherches physicochimiques sur les colloïdes humiques. *Ann. Agron.*, n° 1, p. 18-32.
1914. BOYSEN-JENSEN (B.). — Studies concerning the organic matter of the sea bottom. *Rep. Danish Biol. Stat.*, 22, p. 5.
1931. BRAARUD, TRYGVE, ALF et KLEM. — Hydrographical and chemical investigations in the coastal waters off Mre and in the Romsdalsfjord. *Hvaldradets Skrifter*, n° 1, 88 p., Oslo.
1908. BRABANT (V. L. VAN). — Note sur les étales de courant dans l'onde marée et sur les lieux géométriques. *Ann. Trav. Publ. de Belgique*, XIII, 2, p. 175.
1941. BRAJNIKOV (B.). — Remarques sur une caractéristique des limons. *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 800.
1941. — Sur quelques propriétés des limons. *C. R. Ac. Sc.*, 213, p. 271.
1941. — Contribution à l'étude des limons. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XI, p. 328.
1942. — Sur les constituants des formations superficielles. *C. R. Ac. Sc.*, 214, p. 374.
1942. — Quelques remarques sur la matière organique, le fer et les carbonates dans les limons. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 5, p. 44.
1942. — Quelques considérations sur l'évolution des limons. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XII, p. 91.
1943. — L'utilisation des minéraux lourds en stratigraphie et paléogéographie. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XII.
1904. BRAJNIKOV (V.). — Les pêcheries de l'Extrême-Orient russe. 1 vol., Saint-Petersbourg.
1930. BRIQUET (A.). — Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique. 1 vol., *A. Colin*, Paris.
1912. BRUNET (M.). — La baie de Gavres et ses enveloppes. 1 broch., *Gauthier-Villars*, Paris.
- 1890-91. BUCHANAN. — On the occurrence of sulphur in marine muds and nodules and its bearing on their mode of formation. *Proceed. Roy. Soc. Edimbourg*.

1925. BUEN (R. DE). — De la génèse des rias. *C. R. Ac. Sc.*, 181, p. 1151.
1940. BULLARD (E. C.). — Geophysical study of submarine geology. *Nature*, CVL, p. 764.
1932. *Bulletin of the national research council. Oceanography. Public. Nation. Acad. of Sc. Washington*, 1 vol., 581 p.
1935. BUROLLET (P. A.). — Les horizons bionomiques supérieurs de la côte atlantique marocaine au sud de Rabat. *Bull. Soc. Sc. nat. Maroc*, XV, p. 2.
1938. CAILLEUX (A.). — La disposition individuelle des galets dans les formations détritiques. *Rev. géogr. phys. géol. dyn.*, XI, p. 3.
1942. — Les actions éoliennes périglaciaires en Europe. 1 vol., *Mém. Soc. Géol. Fr.*, XXI, 1-2.
1943. — Distinction des sables marins et fluviaux. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XIII, 4-5-6, 1943, pp. 125-138.
1894. CASSEDEBAT (P. A.). — De l'action de l'eau de mer sur les microbes. *Rev. d'Hyg. et de Pol. San.*, n  2, p. 104.
1906. CAYEUX (L.). — Tourbes immergées de Plougasnou Primel. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, VI, p. 142.
1916. — Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires. *Mém. Cart. Géol. Fr.*, Paris.
1922. — Les minéraux de fer oolithique de France. *Etudes des gîtes minéraux de la France. Imprimerie nationale*, Paris.
1929. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses. *Mém. Cart. Géol. Fr.*, Paris.
1935. — Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées. 1 vol., Masson, Paris.
1924. C L RI R (J.) et CHARTON (A.). — Profils en long des cours d'eau marocains. *Ann. Géogr.*, 33  an., mai, p. 290.
1930. CHABANIER (E.). — Le milieu p trolog ne. *Rev. p trolif.*, n  403.
1917. CHAPUT (E.). — Recherches sur les terrasses de la Loire et de ses principaux affluents. *Ann. Univ. de Lyon.*, N. S., 41, 300 p.
1924. — L'origine des terrasses de la Garonne. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XXIV, 4, p. 449.
1927. CHAUCHARD (A. et B.). — Les variations de salinité des estuaires mesurées *in situ* par la conductivité électrique. *C. R. Ac. Sc.*, 185, p. 1503.
1932. CHAUCHARD (P.). — Sur les facteurs de variation du pouvoir réducteur de l'eau de mer. *C. R. Ac. Sc.*, 194, p. 1256.
1934. — Sur la teneur en oxygène dissous des eaux de la Seine maritime. *C. R. Ac. Sc.*, 198, p. 594.
1934. —  tudes physicochimiques sur les eaux de la Manche et de la Seine maritime. *Ann. Hydrog.*, XIII, p. 72.
1935. — Les facteurs de variation du pouvoir réducteur de l'eau de mer. *Ann. Inst. Océan.*, XV, 3, p. 329.
1939. —  tudes physicochimiques sur les eaux de la Rance canalisée (appréciation de la salinité par la méthode conductimétrique). 1 vol., *Coueslant*, Cahors.
1942. — Les variations de salinité des eaux de la Rance canalisée. *Bull. Lab. marit. Dinard.*, XXIV, p. 41.
1938. CHÉTELAT (E. DE). — Le modèle latéritique de l'Ouest de la Guinée française. *Rev. géogr. phys. géol. dyn.*, XI, p. 1.
1938. — Remarques sur l' le Alcatraz et sur quelques récifs de la côte de la Guinée française. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XI, 2, p. 146.
1915. CHEVALLIER (A.). —  tude bathylithologique des côtes de la Méditerranée. *Ann. Inst. Océan.*, VII, 1, pp. 1-35.
1915. — L' tang de Berre. *Ann. Inst. Océan.*, VII, 4, pp. 1-90.
1909. CHEVALIER (M.). — Notes sur les oscillations des rivages de la Loire inférieure. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, IX, p. 329.
1927. CHEVEY, ROULE et VERRIER. — Sur l'interruption de la montée des saumons par la diminution de la teneur du cours d'eau en oxygène dissous. *C. R. Ac. Sc.*, 185, p. 1527.
1941. CHOUARD, DUFRENOY, EICHORN, EMBERGER, GAUTHERET, MANGENOT, MARESQUELLE et PRAT. — Les idées modernes sur le mécanisme de la photosynthèse. 1. vol., *Actual. scient., Hermann*, Paris.
1934. CLARKE (G. L.). — Penetration of daylight into the sea. *Wood's Hole ocean. Inst., Collect. reprint.*, cont., n  26.

1933. CLARKE (G. L.). — Diurnal migration of plancton in the Gulf of Maine and its correlation with changes in submarine irradiation. *Biol. Bull.*, LXV, n° 3.
1937. — On securing large quantities of diatoms from the sea for chemical analysis. *Science*, LXXXVI, n° 2243.
1932. COLE (A. E.). — Method for determining the dissolved oxygen content of the mud at the bottom of a pound. *Ecology*, XIII, 1, p. 51.
1908. COLLET. — Les dépôts marins. 1 vol., *Doin*, Paris.
1925. — Les lacs. 1 vol., *Doin*, Paris.
- 1921-1923. COLLIN. — Géologie probable du fond de la Rade de Brest et de ses environs. *Bull. Soc. Géol. et Min. de Bretagne*, II, 3, p. 354; IV, 2, p. 85.
1923. — La vallée sous-marine de l'Elorn. *Bull. Assoc. Fr. Avanc. Sc.*, Congrès de Bordeaux.
1934. — Les vallées sous-marines de la côte ouest du Finistère. *Bull. Soc. Océan. Fr.*, n° 77-78.
1891. COMOY. — Etude pratique sur les marées fluviales. 1 vol., Paris.
1925. DANGEARD (L.). — Documents concernant l'étude des sédiments des passes de la Gironde. *Bull. Soc. Géol. Min. Bret.*, IV, 1, p. 258.
1927. — Observations de Géologie sous-marine et d'Océanographie relatives à la Manche. *Ann. Inst. Océan.*, VI.
1939. — Carte lithologique des mers de France (notice explicative et remarques). Extr. de *Geol. der Meere und Binn.*, Bd. 3, Heft 2, pp. 129-142.
1865. DARCY (H.). — Recherches hydrauliques. 1 vol., Paris.
1933. DAVY DE VIRVILLE (A.). — La flore et les conditions physiques des flaques du littoral de l'océan Atlantique et de la Manche. *C. R. Ac. Sc.*, 197, p. 1000.
1934. — Observations et expériences sur les variations de l'alcalinité dans les flaques littorales. *C. R. Ac. Sc.*, 198, p. 1178.
1935. — Recherches écologiques sur la flore des flaques du littoral de l'océan Atlantique et de la Manche. *Rev. gén. botan.*, XLVI et XLVII.
1938. DAVY DE VIRVILLE (A.) et HAMEL (G.). — La flore marine des îles Chausey. 1 broch., *Goupil*, Laval.
1943. DAVY DE VIRVILLE (A.). — *C. R. Som. Soc. biogéogr.*, n° 170.
1942. DEICHA (G.). — Zones bimensuelles, saisonnières et annuelles dans le gypse parisien. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 10, p. 83.
1871. DELESSE. — Lithologie des mers de France et des mers principales du Globe. 2 vol., *Lacroix*, Paris.
1931. DELMAS (H.). — Contribution à l'étude de la végétation et des plantes halophiles de l'embouchure du Bou-Regreg (Maroc). 1 vol., *Imprim. du S.-O.*, Toulouse.
1939. DELPEY (G.). — Les gastéropodes mésozoïques de la région libanaise. *Notes et mémoires, Sec. géol. du Haut-Com. Rep. Fr. en Syrie et au Liban*, III.
1912. DEMOLON (A.). — Sur l'action fertilisante du soufre. *C. R. Ac. Sc.*, 154, p. 524.
1913. — Recherches sur l'action fertilisante du soufre. *C. R. Ac. Sc.*, 156, p. 725.
1921. — Sur le pouvoir sulfoxydant des sols. *C. R. Ac. Sc.*, 173, p. 1408.
1938. — La dynamique du sol. 1 vol., *Dunod*, Paris.
1921. DENIZOT (G.). — Les alluvions du bassin de la Loire. *Bull. Géol. et Min. Bret.*, 11, 4, p. 430.
1923. — Contribution à l'étude du Quaternaire de France. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XXIII, p. 384.
1935. — Sur la répartition des basses alluvions dans la vallée de la Loire. *C. R. Ac. Sc.*, 201, p. 975.
1918. DEPÉRET (CH.). — Essai de coordination chronologique générale des temps Quaternaires. *C. R. Ac. Sc.*, 166, p. 480; 166, p. 636; 884, 167, p. 418.
1884. DITTMAR (W.). — Report of researches into the composition of ocean-water, collected by H. M. S. *Challenger*, during the years 1873-1876. *Physic. and chemistry*, vol. 1.
1914. DOLLFUS (R. PH.). — Les zones subterrestre et littorale à l'île Tatihou et dans la région de Saint-Vaast-la-Hougue (Manche). *Bull. Mus. Hist. nat.*, 4, p. 254.
1912. DOSS (B.). — Ueber die Natur und Zusammensetzung des in miocänem Tonen des Gt. Samara auftretenden Schwefeleisens. *New. Jahrb. Beilb.*, XXXIII, p. 662.
1936. DOUVILLÉ (F.). — Foraminifères de Roscoff. *Trav. Stat. biol. Roscoff*, 14, p. 51.

1934. DRENEAU (L.). — Notice sur la Dive. 1 broch., 37 p., *Imp. Prax*, Marans.
1921. DUBOIS (G.). — Notes géographiques et géologiques sur l'estuaire de la Canche. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, XLVI, p. 9.
1924. — Recherches sur les terrains quaternaires du Nord de la France. *Mém. Soc. Géol. Nord*, Lille, 8, n° 1, 335 p.
1925. — Sur la nature des oscillations de type atlantique des lignes de rivages quaternaires. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XXV, p. 857.
1930. — Un tableau de l'Europe Flandrienne. *Livre jubilaire de la Soc. Géol. Fr.*, 1, p. 263.
1929. DUCLAUX (J.). — Les colloïdes. 1 vol., *Gauthier-Villars*, Paris.
1934. — Traité de chimie physique appliqué à la biologie. 2 vol., *Hermann*, Paris.
1942. — Physique colloïdale et biologie. 1 vol., *Actual. Scient.*, *Hermann*, Paris.
1942. — Chimie colloïdale et biologie. 1 vol., *Actual. scient.*, *Hermann*, Paris.
1885. DURAND-CLAYE (A.). — Analyse d'un mémoire de M. VAUTHIER : « De l'entraînement et du transport par les eaux courantes, des vases, sables et graviers. » *Ann. Ponts et Chauss.*, 6<sup>e</sup> sér., t. 8, pp. 1065-1078.
1934. ELLIS (M. M.). — A photo-electric apparatus for turbidity and light penetration measurement. *Science*, 80, p. 37.
1936. — Erosion silt as a factor in aquatic environments. *Ecology*, XVII, 1, p. 29.
1926. EMBERGER (L.), RÉGNIER (R. P.). — Aperçu sur la végétation de l'embouchure du Bou-Regreg. *Bull. Soc. Sc. Nat. Maroc.*, VI.
1939. FABRE (A.). — Les terrains de revêtement du Médoc. 1 vol., 333 p., *Drouillard*, Bordeaux.
1894. FARGUE. — Expériences relatives à l'action de l'eau courante sur fond de sable. *Ann. Ponts et Chauss.*, 7<sup>e</sup> sér., p. 426.
1939. FATCHICHINA (O.). — The absorption capacity of the lake deposits. *Proc. of the Kossino limnol. Stat. of the hydrometeor Serv. of U. S. S. R.*, 22, p. 5.
1933. FELDMANN (J.) et DAVY DE VIRVILLE (A.). — Sur les relations entre les conditions physiques et la flore des flaques littorales de la côte des Albères. *C. R. Ac. Sc.*, 197, p. 870.
1913. FERRONNIÈRE (G.). — Terrasses fluviales et terrasses marines à l'embouchure de la Loire. *Bull. Soc. Sc. Nat. de l'Ouest.*, 3<sup>e</sup> sér., 3, p. 169.
1921. — Notes de géologie marine. II. Phénomènes transgressifs et pseudo-régression. *Bull. Soc. Géol. Minér. Bretagne*, 11, p. 198.
1927. FISCHER (E.). — Rapport sur le pouvoir réducteur de l'eau de mer et la répartition des organismes du littoral. *C. R. Ac. Sc.*, 185, p. 1525.
1928. — De l'influence du phénomène des marées sur la répartition verticale des organismes littoraux. *Bull. Soc. Zool. Fr.*, LIII, p. 381.
1929. — Recherches de bionomie et d'océanographie littorales sur la Rance et le littoral de la Manche. *Ann. Inst. Océan.*, V.
1940. — Sur quelques progrès récents et sur les méthodes et tendances actuelles en bionomie intercotidale. *Soc. Biogéogr.*, vol. H. S., n° 7, p. 393.
1941. — Croissance, taille et longévité de quelques animaux intercotidaux. *Ann. Inst. Océan.*, XXI, 1, pp. 1-28.
1942. FLORENTIN (J.) et L'HÉRITEAU (G.). — Mesure du pH des terres. *Inst. tech. Bat. T. P.*, circul. D 3.
1927. FONTAINE (M.). — Sur les causes d'une variation de salinité observée dans l'océan à la pointe du Croisic. *C. R. Ac. Sc.*, 185, p. 1055.
1932. — Recherches physiologiques et biologiques sur les civelles. *Bull. Inst. Océan.*, n° 603.
1943. — Les aspects physiologiques d'une vie cyclique de l'anguille d'Europe. *Bull. Muséum*, 2<sup>e</sup> série, XV, n° 5.
1912. FORCH (Z. B. C.). — Die Fällung feiner Tontrübungen in Salzlösungen. *Ann. d. Hydrogr. und marit. Meteor.*, XL, pp. 23-30.
- 1905-1907. FOX (CH.-J.). — 1° On the determination of the atmospheric gases dissolved in sea water; 2° On the coefficients of absorption of the atmospheric gases in distilled water and sea water. *Journ. Cons. Perm. pour explor. de la mer* : 1° Public. de circonst., n° 21, 1905; 2° Public. de circonst., n° 41, 1907.

1938. FRANCIS-BŒUF (CL.). — Le problème du plateau continental et des vallées sous-marines. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XI, 3, pp. 254-285.
1938. — Mesures de transparence des eaux de l'Aulne maritime, à Trégarvan. *C. R. Ac. Sc.*, 207, p. 1002.
1938. — Premiers résultats d'une étude des eaux de l'Aulne maritime. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XI, 4, p. 399.
1939. — Sur les variations de salinité, au cours d'une journée de septembre, des eaux de l'Aulne maritime, à Trégarvan. *C. R. Ac. Sc.*, 208, p. 762.
1939. — Remarques sur quelques mesures de salinité des eaux de l'Orne entre Caen et l'embouchure (Franceville) *C. R. Ac. Sc.*, 208, p. 916.
1939. — Notes sur quelques dépôts fluvio-marins de la côte de Guinée. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XII, p. 399.
1939. FRANCIS-BŒUF (CL.), BOURCART (J.). — Sur la véritable signification des sables vaseux et vases sableuses. *C. R. Ac. Sc.*, 209, p. 568.
1941. FRANCIS-BŒUF (CL.). — Variations, au cours du flot, de quelques facteurs physico-chimiques, dans l'estuaire du Bou-Regreg (Maroc occidental). *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 565.
1941. — Isohalines de flot et isohalines de jusant, dans l'estuaire du Bou-Regreg (Maroc occidental), en période d'étiage. *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 619.
1941. — Observations sur les variations de quelques facteurs physicochimiques des eaux de la Penzé maritime (Finistère). *C. R. Ac. Sc.*, 212, p. 805.
1941. — Résultats des mesures physicochimiques effectuées à bord du « Chasseur 2 », le long de la côte marocaine, entre Port-Lyautey et Mazagan, au mois de janvier 1941. *Bull. Ins. Océan.*, n° 804.
1941. FRANCIS-BŒUF (CL.). — Sur la teneur en chlorures de quelques sédiments fluvio-marins. *C. R. Ac. Sc.*, 213, p. 657.
1941. — Le rapport de l'azoté à la matière organique totale dans les vases de l'estuaire de la Penzé (Finistère). *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 14, p. 109.
1941. FRANCIS-BŒUF (CL.), BOURCART (J.) et RAJČEVIĆ (B.). — Sur le mécanisme de la sédimentation des vases dans les estuaires. *C. R. Ac. Sc.*, 213, p. 1025.
1942. FRANCIS-BŒUF (CL.). — Sur la teneur en fer des sédiments fluvio-marins. *C. R. Ac. Sc.*, 214, p. 279.
1942. — Remarques sur la teneur en fer des vases des estuaires. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 3, p. 26.
1942. — Mesures physicochimiques des eaux de la Penzé maritime (Finistère). *Bull. Inst. Océan.*, n° 829.
1942. — Les phénomènes de sédimentation dans les estuaires. *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, n° 146, p. 64.
1942. — Sur la présence du schorre et sa signification dans les estuaires. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 15, p. 182.
1942. FRANCIS-BŒUF (CL.) et BOURCART (J.). — La vase. 1 vol., *Actual. Scient., Hermann*, Paris.
1943. FRANCIS-BŒUF (CL.), BRAJNIKOV (B.) et ROMANOVSKY (V.). — Techniques d'étude des sédiments et des eaux qui leur sont associées. 1 vol., *Actual. Scient., Hermann*, Paris.
1943. FRANCIS-BŒUF (CL.). — Sur la constitution des sédiments vaseux de l'estuaire de la Loire. *Bull. Inst. Océan.*, n° 839.
1943. — Physicochimie du milieu fluvio-marin. *C. R. Som. Soc. Biogéogr.*, n° 169.
1935. FRASER (H. J.). — Experimental study of the porosity and permeability of clastic sediments. *Journ. Geol.*, XLIII, p. 910.
1935. FREUNDLICH. — Thixotropy. 1 vol., *Actual. Scient., Hermann*, Paris.
1938. GAUDRY (R.). — Les températures de l'estuaire du Saint-Laurent. *Station biol. du Saint-Laurent*, n° 13.
1935. GAUTIER (E. F.). — L'Afrique noire occidentale. *Public. Com. Et. Hist. Sc. A. O. F.*, sér. A, n° 4, 1 vol., *Larose*, Paris.
1922. GENTIL (L.). — Notice sur les titres et travaux scientifiques. 1 vol., *Larose*, Paris.
1936. GESSNER (H.). — L'analyse mécanique. 1 vol., *Dunod*, Paris.

1935. GHALI (M.). — Mouvement des matières en suspension dans les eaux des fleuves. Chute des corps sphériques dans l'eau. *Thèse, Gauthier-Villars, Paris.*
1904. GIARD (A.). — Sur une faunule caractéristique des sables à Diatomées d'Ambleteuse (Pas-de-Calais). *C. R. Soc. Biol.*, 20 fév.
1940. GIBERT (M.). — La Loire maritime. *Ann. Ponts et Chauss.*, 2 et 3.
1933. GIBSON (A. H.). — Construction and operation of a tidal model of the Severn estuary. *H. M. Stationery office, London.*
1936. GILLET (A.) et ANDRAULT DE LANGERON (N.). — Introduction à l'étude des colloïdes. 1 vol., *Hermann, Paris.*
1938. GLANGEAUD (L.). — Sur une méthode d'étude des troubles en suspension dans les estuaires et les fleuves. *C. R. Ac. Sc.*, 206, p. 1667.
1938. — Transport et sédimentation dans l'estuaire et à l'embouchure de la Gironde. Caractères pétrographiques des formations fluviales, saumâtres, littorales et néritiques. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, VIII, 7-8.
1938. — Etudes quantitatives et expérimentales sur l'érosion et le transport par les eaux courantes. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.* XI, 4.
1939. — Le mouvement des sédiments et la formation des bancs, seuils et mouilles dans la Garonne et l'estuaire de la Gironde. *Congr. Inter. Union Géod. Géogr.*, Washington, Potamologie, Q. 3, R. 6.
1939. GLANGEAUD (L.) et BONICHON (Y.). — Sur les causes dynamiques des variations de turbidité et du débit solide dans la Garonne maritime et la Gironde, au cours de la marée. *C. R. Ac. Sc.*, 208, p. 1072.
1939. GLANGEAUD (L.). — Rôle de la suspension tourbillonnaire et du roulement sur le fond dans la formation des sédiments actuels de l'estuaire girondin entre Bordeaux et la Pointe de Grave. *C. R. Ac. Sc.*, 208, p. 1595.
1941. — Evolution morphologique et dynamique des estuaires. *Bull. Assoc. Géogr. Fr.*, n° 140-141, p. 95.
1941. — Sur la formation et la répartition des facies vaseux dans les estuaires. *C. R. Ac. Sc.*, 213, p. 1022.
1933. GRAN (H. H.). — Studies on the biology and chemistry of the gulf of Maine : II. Distribution of phytoplankton in August 1932. *Biol. Bull.*, LXIV, n° 2.
1913. GREGORY (J. W.). — The nature and origin of fjords. 1 vol., London.
1907. GUILBERT (L.). — Forêts immergées de la côte bretonne (Baie de Saint-Brieux). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, VII, p. 511.
1899. GULLIVER (F. P.). — Shoreline topography. *Proc. Amer. Ac. of Arts and Sc.*, XXXIV.
1924. HAMEL (G.). — Le cours inférieur de la Rance. *Bull. Mus. Hist. nat.*, XXX.
1919. HARDER (E. C.). — Iron depositing bacteria and their geologic relation. *U. S. Geol. Surv.*, Washington, *Profess. pap.*, 113.
1939. HARTULARI (E.). — Bacteriological and chemical researches of a number of lakes in the neighbourhood of Moscow in connection with the problem of mud decomposition with gas formation. *Proc. of Kossino limnol. stat. of the hydrometeor. Serv. of U. S. S. R.*, 22, p. 115.
1925. HARVEY (H. W.). — Oxidation in sea water. *Journ. Mar. Biol. Assoc.* 13, p. 953.
1926. — Nitrate in the sea. *Journ. mar. Biol. Assoc.*, 14, p. 71.
1928. — Biological Chemistry and Physics of sea water. *Cambridge, University Press.*
1932. HATSCHEK (E.). — La viscosité des liquides. 1 vol., *Dunod, Paris.*
1907. HAUG (E.). — Traité de géologie. T. I : Les phénomènes géologiques. 1 vol, *Armand Colin, Paris*, pp. 472-510.
1895. HAUTREUX (A.). — Côte des Landes et Bassin d'Arcachon; densités de la surface de la mer. *Bull. Soc. Géogr. Comm. Bordeaux*, XVIII.
1930. HÉRUBEL (M.). — Les origines des ports de la Seine maritime. 1 vol., *Soc. Ed. Géogr.*, Paris.
1932. — Les origines des ports de la Loire maritime. 1 vol., *Soc. Ed. Géogr.*, Paris.
1934. — Les origines des ports de la Gironde maritime. 1 vol., *Soc. Ed. Géogr.*, Paris.

1932. HISSINK (D. J.). — Le desséchement du Zuyderzée au point de vue agronomique. *Ann. Agron.*, 2<sup>e</sup> an., n° 1, pp. 10-29.
1938. HJORT (J.). — Deep sea prawn fisheries and their problems. *Hvalonardels skrifta*, n° 17.
1935. HJULSTROM. — Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bull. Géol. Inst. Upsala*, XXV, p. 221.
1914. HUNTER (J. F.). — Erosion and sedimentation in Chesapeake around the mouth of Choptank River. *Prof. Paper*, 90-B. *U. S. Geol. Surv.*, 15 p.
1923. HUNTSMAN (A. G.). — The influence of Tidal oscillations on vertical circulation in estuaries. *Univ. of Toronto*, sec. v., p. 11.
1926. ISSATCHENKO (B.). — Sur la nitrification dans les mers *C. R. As. Sc.*, 182, p. 185.
1929. JEFFREYS (H.). — On the transverse circulation in streams. *Proced. Cambridge Phil. Soc.*, XXV, p. 20.
1929. — On the transport of sediments by streams. *Proced. Cambridge Phil. Soc.*, XXV, p. 272.
1918. JOHANSEN (A. C.). — Randers Fjords Naturhistorie. *C. A. Reitzel*, Copenhagen.
1917. JOHNSON (D. W.). — Shore processes and shoreline development, 1 vol., *J. Wiley*, Londres.
1925. — The new england acadian shoreline, 1 vol., *J. Wiley*, Londres.
1926. JOHNSON (F. H.). — The oxygen uptake of marine bacteria. *Journ. of bacterio*, XXXI, 5.
1921. JOHNSON (W. A.). — Sedimentation of the Fraser River delta. *Mem.*, 125; *Geol.*, sér. n° 107; *Geol. Surv. Canada*, p. 17.
1928. JOLY (G. DE). — Travaux maritimes : la mer et les côtes, publiés par CH. LAROCHE. *Baillière*, Paris. 480 p.
1938. JORGENSEN (H.). — Théorie, mesure et application du pH. 1 vol., 342 p., *Dunod*, Paris.
1921. KAYSER (E.). — Microbiologie appliquée à la fertilisation du sol. 1 vol., *Baillière*, Paris.
1892. KERVILER (R.). *Armorique et Bretagne*. 1 vol., 286 p.
1934. KHOUVINE (Y.). — Cellulose et bactéries : décomposition et synthèse. 1 vol., *Hermann*, *Actual. Scient.*, n° 164.
1897. KNUDSEN (M.). — *Beret, fra Komm. far Vidensk. Underst.*, N. F. 1, 2, p. 174.
1901. — *Hydrographische Tabellen*. 1 vol., Hambourg.
1939. KONSHIN (V.). — Forms of nitrogen in lake deposits. *Proc. of Kossino limnol. stat. of the hydrometeor. Serv. of U. S. S. R.*, 22, pp. 105-113.
1904. KROGH (A.). — On the tension of Carbonic acid in natural waters and especially in the sea. *Meddedels. om Grönland*, vol. XXVI, p. 333.
1934. KROGH (A.) and KEYS (A.). — Methods for determination of dissolved organic carbon and nitrogen in sea water. *Biol. Bull.*, LXVII, n° 1, august.
1939. KRUMBEIN (W. C.) et CALDWELL (L. T.). — Areal variation of organic carbon content of Barataria bay sediments, Louisiana. *Bull. Amer. Assoc. of Petrol. Geol.*, XXIII, 4, p. 582.
1939. KRUMBEIN (W. C.). — Tidal lagoon sediments on the Mississippi delta. *Bull. Amer. Assoc. of Petrol. Geol.*, XXIII, 9, p. 178.
1939. KUSNETZOW (S. J.). — Determination of the intensity of oxygen, absorption in the lake water, caused by bacteriological processes. *Proc. of the Kossino. limnol. stat. of the hydrometeor. Serv. of U. S. S. R.*, 22, pp. 53-74.
1939. KUSNETZOW, SPERANSKAIA, KONSHIN. — Composition of organic matter in the bottom deposits of different lakes. *Proc. of Kossino limnol. stat. of the hydrometeor. Serv. of U. S. S. R.*, 22, pp. 75-104.
1922. LABBÉ (A.). — La variation de la concentration en ions hydrogène dans les marais salants, comme facteur biologique. *C. R. Ac. Sc.* 175, p. 843.
1923. — La formation du gypse dans les marais salants. *Congr. Soc. Sav.*, avril.
1927. — L'origine des marais salants du Croisic. *Ann. Inst. Océan.*, 111, 8, p. 325.
1932. — Le pH et le rythme des marées. *C. R. Ac. Sc.*, 195, p. 1297.
1932. — La notion du pH en Océanographie et en biologie marine. *Ann. Inst. Océan.*, XII, p. 217.
1936. LACKEY (J. B.). — Occurrence and distribution of the marine protozoan species in the Wood's Hole area. *Biol. Bull.*, LXX, 2.

1927. LACROIX (E.). — Sur une vase à Foraminifères de la Baie de Morlaix. *Trav. Stat. biol. Roscoff.*, fasc. 6, p. 1.
1939. LALOU (CL.). — Sur la granulométrie de quelques sables dunaires. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, t. XII, fasc. 1.
1931. LAMI (R.). — Sur l'hétérogénéité saline des cuvettes littorales pendant les pluies. *C. R. Ac. Sc.*, 193, p. 1579.
1931. — Le *Fucus lutarius* Ktz. dans ses stations françaises de la Manche occidentale. *Rev. Trav. Crypto. dédiés à L. Mangin, Labor. de Crypto. du Mus. nat. Hist. nat.*
1933. — Variations du pH de l'eau de mer à l'entrée de la Rance. *Bull. Lab. Saint-Servan*, XI, p. 9.
1934. — Sur l'hétérogénéité de quelques caractères physiques des cuvettes littorales. *C. R. Ac. Sc.*, 198, p. 1528.
1898. LAPPARENT (A. DE). — Leçons de géographie physique. 1 vol., Masson, Paris, pp. 262-289.
1906. — Traité de géologie : les phénomènes actuels. 1 vol., Masson, Paris, pp. 211-262.
1940. LAURENT (J.). — Contribution à l'application des lois de similitude aux essais sur modèles réduits d'hydraulique fluviale. Etude d'un fleuve à marées. 1 vol., Thèse, Paris (mai).
1911. LEBEDEFF (V. N.). — La rivière Kamtchatka. *Izv. Rouss. G. ob.*, XIV, p. 27.
1871. LÉCHALAS. — Sur les rivières à fond de sable. *Ann. Ponts et Chauss.*, 5<sup>e</sup> série, 1, p. 381.
1926. LECOINTRE (G.). — Recherches géologiques dans la Meseta marocaine. *Mem. Soc. Sc. nat. maroc.*, n° 14.
1933. LECOMTE DU NOUY. — Méthodes physiques en biologie. 1 vol., Baillière, Paris.
1934. LE DANOIS (ED.). — Les transgressions océaniques. *Rev. des Trav. Off. Pêch. marit.*, VII, 4.
1936. — Observations hydrologiques des quatre premières croisières du navire « Président-Th. Tissier ». *Rev. Trav. off. Pêch. marit.*, IX, 2.
1908. LEGENDRE (R.). — Recherches océanographiques faites dans la région littorale de Concarneau, pendant l'été 1907. *Bull. Inst. Océan.*, n° 111.
1909. — Recherches sur les variations de température, de densité et de teneur en oxygène de l'eau de la côte à Arcachon. *Bull. Stat. biol. Arcachon.*, XII, p. 95.
1909. — Recherches physicochimiques sur l'eau de la côte à Concarneau. *Bull. Inst. Océan.*, n° 144.
1921. — Influence de la salinité de l'eau de mer sur l'assimilation chlorophyllienne des algues. *C. R. Soc. Biol.*, LXXXV, p. 222.
1922. — Variations diurnes de la concentration en ions hydrogène de l'eau de mer littorale. *C. R. Ac. Sc.*, 175, p. 773.
1923. — Mares supralittorales à *Harpacticus*. *C. R. Soc. Biol.*, LXXXIV, p. 722.
1924. — Variations de concentration des ions hydrogène des fonds marins littoraux. *C. R. Soc. Biol.*, 90, p. 183.
1925. — La concentration en ions hydrogène de l'eau de mer. Le pH. 1 vol., Presses universitaires, Paris.
1937. — Bibliographie complémentaire sur la concentration en ions hydrogène de l'eau de mer. *Bull. Inst. Océan.*, n° 724.
1937. — Les prises d'eau de mer et les dosages chimiques à bord. *Ann. Inst. Océan.*, XVI, p. 335.
1938. — La corrosion à l'eau de mer. *Rev. Scient.*, 15 avril.
1934. LEIGHTLY (J.). — Turbulence and transportation of rock debris by streams. *Geogr. Rev.*, XXIV, p. 453.
1885. LENNIER (G.). — L'estuaire de la Seine. 1 vol., Le Havre.
1936. LÉVÊQUE (F.). — Bordeaux et l'estuaire girondin. 1 vol., 163 p., Bordeaux.
1926. LIPMAN (C. B.). — The concentration of sea water as affecting its Bacterial population. *Journ. Bact.*, 12, p. 311.
1930. LLOYD (B.). — Bacteria of the Clyde sea Area : a quantitative investigation. *Journ. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 16, p. 879.
1931. — Muds of the Clyde sea area. *Journ. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 17, p. 751.
1892. LOCARD (A.). — L'influence des milieux sur le développement des mollusques. *Pitrat*, Lyon, p. 93.

1942. LUCAS (G.). — Description géologique et pétrographique des Monts de Ghar Rouban et du Sidi el Abed (frontière algéro-marocaine). 2 vol., *Thèse, Barnéoud*, Paris.
1938. LUX (R.). — Sur la teneur en matière organique des sédiments marins à Monaco et à Concarneau. *Bull. Inst. Océan.*, n° 760.
1939. — Variations saisonnières de la teneur en azote des sédiments marins dans la région de Monaco. *Bull. Inst. Océan.*, n° 766.
1917. MAC CLENDON (J. F.). — Diurnal changes in the sea at Tortugas. *Proc. Nat. Ac. Sc.*, III, p. 692.
1918. — On changes in the sea and their relation to organismes. *Pap. Dep. Mar. Biol. Carnegie Inst.*, XII, p. 213.
1906. MACHAT (J.). — Les rivières du Sud et le *Fouta Djallon*. 1 vol., *Challamel*, Paris.
1929. MAGROU (J.). — La vie du sol. 1 vol., *Spes.*, Paris.
1931. MAIWALD (K.). — Organische Bestandteile des Bodens. *Handbuch der Bodenlehre*, VII, p. 113-204, Berlin.
1938. MARIE (P.). — Sur les Foraminifères des bassins à flot de Saint-Malo. *Bull. Labor. Dinard*, fasc. 18, pp. 31-33.
1938. — Sur la faune des Foraminifères de l'estuaire de la Rance. *Bull. Labor. de Dinard*, fasc. 20, pp. 68-86.
1936. MARLIÈRE (R.). — Sur l'Albien et le Cénomani en dans le Nord de la France et le bassin de Mons : « Meule, grès vert », « Vraconnien ». *Ann. Soc. Géol. Belg.*, LX, p. 132.
1903. MARTONNE (E. DE). — Le développement des côtes bretonnes et leur étude morphologique. *Trav. Sc. Univ. Rennes*, 11.
1906. — La péninsule et les côtes bretonnes. *Ann. de Géogr.*, t. XV, n° 81-82.
1908. MASSART (J.). — Essai de géographie botanique des districts alluviaux et littoraux de la Belgique. *Rec. Inst. Bot. Leo Errera*, VII, pp. 167-584.
1939. MAYER (A.). — Sols et fondations. 1 vol., *Armand Colin*, Paris.
1937. MAZURE (J. P.). — De berekening van getijden en stormvloed op beneden rivieren. *Drukkerij Gerretsen Meidoornstraat.*, 2, 3 Gravenhage, 223.
1923. MICHEL (H.). — La question de l'aménagement de l'estuaire de la Seine. *Assoc. Fr. Avanc. T. P.*, bull. n° 20, 32 p.
1928. — Le dilemme de la Basse Seine. 1 broch., *Libr. Enseig. Techn.*, 32 p.
1933. MITCHELL (P. H.) et RAKESTRAW (N. W.). — The buffer capacity of sea water. *Bio. Bull.*, LXV, 3.
1934. MITCHELL (P. H.) and SOLINGER (J. L.). — The effects of land drainage upon the excess bases of sea water. *Biol. Bull.*, LXVI, 2.
1936. MITCHELL, BUCH et RAKESTRAW. — The effect of salinity and temperature upon the dissociation of cresol red and phenol red in sea water. *Journ. Cons. intern. explor. mer.*, XI, p. 183.
1938. MOITY (M.). — *Le planteur de l'Ouest Africain*, n° 6, p. 7.
1910. MOLISCH. — Die Eisenbakterien. 1 vol., Iéna.
1926. MONOD (Th.). — La région de la Basse Seulle. *Trav. Stat. biol. Roscoff*, 4, p. 1.
1930. MOORE (H. B.) et NEIL (R. J.). — An instrument for sampling marine muds. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, 16, pp. 589-594.
- 1930-31. MOORE (H. B.). — The muds of the Clyde sea area. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, 16, pp. 595-607; 17, pp. 325-358.
1900. MUNIER-CHALMAS et PELLAT. — Falaises jurassiques du Boulonnais. *Livret-guide du VIII<sup>e</sup> Congrès géol. internat.*, Paris.
1886. MURRAY (J.). — On seas and estuaries about North Britain. *Philosoph. Soc. of Glasgow*.
1889. MURRAY (J.) et IRVINE (R.). — On coral reefs and other Carbonate of lime formations in modern seas. *Proced. Roy. Soc. Edinburg.*, vol. 17, p. 79.
1891. MURRAY (J.) et RENARD (A. F.). — Report on Deep Sea Deposits based on the specimens collected during the voyage of H. M. S. Challenger in the years 1872-1876. Londres.
1893. MURRAY (J.) et IRVINE (R.). — On the chemical changes which take place in the composition of sea water associated with blue muds on the Floor of the ocean. *Trans. Roy. Soc. Edinburg*, XXVII.

1912. MURRAY (J.) et HJORT (J.). — The depths of the ocean. 1 vol., *Macmillan*, Londres.
1928. MUSSET. — La vallée sous-marine de l'Elorn, d'après les travaux du nouveau pont de Plougastel. *Bull. Soc. géol. et minér. Bret.*, t. IX, fasc. 1, 2, 3, 4.
1938. NADEAU (A.). — Salinités des eaux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Station biol. du Saint-Laurent*, n° 11.
1936. NEWCOMBE (C. L.). — A comparative study of the abundance and the rate of growth of *Mya arenaria* L. in the Gulf of St. Lawrence and bay of Fundy regions. *Ecology*, XVII, 3, p. 418.
1930. NICLOUX (M.). — Dosage de l'oxygène dissous dans l'eau de différentes origines : eau de mer, eau douce. *Bull. Soc. chim. biol.*, t. XII, n° 10 (déc.).
1935. NICOL. — The ecology of a salt marsh. *Journ. Mar. Biol. Assoc., U. K.*, XX, p. 203.
1920. OLIVER (F. W.). — *Spartina* problems. *Ann. of applied biol.*, VII, 1, p. 25.
1928. — The economic possibilities of rice grass (*Spartina townsendi*). *Journ. of minist. agric.*, XXXV, 8, p. 709.
1933. PARDE (M.). — Fleuves et rivières. 1 vol., *Armand Colin*, Paris.
1937. PARR (A. E.). — On the probable relationship between vertical stability and lateral mixing processes. *Whole Hole's O. I., collect. rep.* 1936, cont. n° 97.
1861. PARTIOT (E.). — Etude sur le mouvement des marées dans la partie maritime des fleuves. 1 vol., Paris.
1871. — Sur les sables de la Loire. *Ann. Ponts et Chauss.*, 5° sér., t. 1, pp. 233-292.
1892. — Etude sur les rivières à marée et sur les estuaires. 1 vol., Paris.
1937. PAULIAN (R.) et MOREL (H.). — Etude bionomique du polder de l'Aber (Roscoff). *Trav. Stat. biol. Roscoff*, fasc. 15, pp. 89-98.
1939. PELLERIN (E.). — Sur une bouteille pour prises d'eau. *C. R. Ac. Sc.*, t. 208, pp. 1039-1041.
1939. — Sur les appareils d'océanographie fluvio-maritime. *C. R. Ac. Sc.*, t. 208, pp. 2097-2099.
1929. PERCIVAL (E.). — A Report on the fauna of the estuaries of the river Tamar and the river Lynher. *Journ. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, N. S. 16, n° 1, p. 81.
1904. PERRIN (J.). — Mécanisme de l'électrisation de contact et solutions colloïdales. *Journ. Chim.-phys.*, t. 2, p. 602.
1926. POOLE (H. H.) et ATKINS (W. R. G.). — On the penetration of light into sea water. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, 15, p. 445.
1928. — Further photo-electric measurements of the penetration of light in sea water. *Journ. Mar. Biol. Assoc.*, 15, p. 455.
1936. PORTIER (P.). — Micro-organismes de la vase des océans. *C. R. Soc. Biol.*, mars.
1938. — Physiologie des animaux marins. 1 vol., *Bibliot. philo-scient., Flammarion*, Paris.
1912. POTONIÉ. — Die rezenten Kaustobiolithe und ihre Lagerstätten. *Abh. Kgl. Preuss. geol. Landesanstalt*, N. F. 55, III, p. 216.
1931. PRATJE (O.). — Einführung in die Geologie der Nord-und Ostsee. *Tierwelt der Nord-und Ostsee*, I d, 1-44 (mars).
1926. PRENANT (M.) et DUVAL (M.). — Observations sur les variations de salure dans quelques estuaires de la région de Roscoff. *Trav. Stat. Biol. Roscoff*, fasc. 4, 14 p.
1929. PRENANT (M.). — Remarques sur les conditions écologiques dans les estuaires. *Bull. Soc. Zool. Fr.*, t. LIV, pp. 210-212.
1931. — La biologie des estuaires. *Ass. fr. Avanc. Sc.*, pp. 405-413.
1932. — L'analyse mécanique des sables littoraux et leurs qualités écologiques. *Arch. Zool. Exp. Gén.*, t. LXXIV, pp. 581-595.
1932. — La baie et la pointe de Quiberon. *Trav. Stat. biol. Roscoff*, fasc. 10, pp. 37-103.
1934. — Adaptation, écologie et biocœnotique. 1 vol., *Actual. Scient., Hermann*, Paris.
1934. — Contribution à l'étude écologique des sables littoraux. *C. R. S. Soc. biogéol.*, XI, n° 89, pp. 17-19.
1936. — Sur quelques types de sables littoraux. *C. R. S. Soc. biogéogr.*, XIII, n° 106, pp. 1-3.
1936. — Notes bionomiques sur le littoral de la baie de Douarnenez. *C. R. S. Soc. biogéogr.*, XIII, n° 113, pp. 61-63.
1937. — Recherches écologiques sur les sables marins. *Ann. Inst. Océan.*

1937. — Notice sur les titres et travaux scientifiques. *Hermann*, Paris.
1930. PRUVOST (P.). — Subsidence et sédimentation. *Livr. jubil. Cent. Soc. Géol. fr.*, pp. 545-564.
1897. PRUVOT (G.). — Essai sur les fonds et la faune de la Manche occidentale (côtes de Bretagne), comparés à ceux du Golfe de Lion. *Arch. Zoo. Experiment.*, sér. 3, t. V, p. 511.
1938. RAJČEVIĆ (B.). — Sur le régime des sables de l'estuaire de la Seine. *C. R. Sc.*, 207, p. 1431.
1938. — Etude de la salinité des eaux de la Neretva. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XI, 4, p. 38.
1938. — Sur le régime des sables de l'estuaire de la Seine. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XI, 4, p. 439.
1939. — Sur la salinité des eaux de la Seine, entre Amfreville et Honfleur. *C. R. Ac. Sc.*, 208, p. 760.
1939. — Essai sur la sédimentation dans le bras de Freneuse. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XII, 2, 329.
1939. — Etude sur la sédimentation dans l'embouchure de la Neretva. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XII, 4, p. 481.
1933. RAKESTRAW (N. W.). — Studies on the biology and chemistry of the gulf of Maine. Chemistry of the gulf of Maine in August 1932. *Biol. Bull.*, LXIV, 2.
1936. — The occurrence and significance of nitrite in the sea. *Biol. Bull.*, LXXI, 1.
1937. RAKESTRAW (N. W.), MAHNCKE (H. E.) et BEACH (E. F.). — Determination of iron in sea water. *Indust. and Engin. Chem.*, vol. 8, 1936, Wood's Hole O. I., collect. rep 1936, cont. n° 86.
1925. RAMAGE et MILLER. — The salt-error of cresol red. *Journ. Am. Chem. Soc.*, XVIII, p. 1230.
1927. RANSON (G.). — L'absorption des matières organiques dissoutes par la surface extérieure du corps chez les animaux aquatiques. *Ann. Inst. Océan.*, IV, 3.
1943. — La vie des Huitres. 1 vol., *Gallimard*, Paris.
1931. RAYMOND (P. E.) et STETSON (H. C.). — A new factor in the transportation and distribution of marine sediments. *Science*, 73, pp. 105-106.
1935. REDFIELD (A. C.). — On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. *Wood's hole Ocean. Instit. Collected reprints*, 1934, cont. n° 30.
- 1930-32. REID (D. M.). — Salinity Interchange between sea water in sand and overflowing fresh water at low tide. *Journ. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 16, p. 609; 18, p. 299.
1933. REUSZER (H. W.). — Marine bacteria and their rôle in the cycle of life in the sea. The distribution of bacteria in the ocean waters and muds about Cape Cod. *Biol. Bull.*, LXV, n° 3.
1886. RICHTHOFFEN (FR.). — Führer für Forschungsreisende. 1 vol., Hanovre.
1938. RILEY (G. A.). — The significance of the Mississippi river drainage for biological conditions in the northern gulf of Mexico. Wood's Hole O. I., collect. reprints 1937, cont. n° 150.
1912. RINNE (F.). — Etude pratique des roches. 1 vol., *Lamarre*, Paris.
1936. RIVIÈRE (A.). — Le traict du Croisic. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XI, 2, pp. 163-194.
1937. — L'interprétation rationnelle des spectres de tamisage des sédiments sableux et la signification géologique des diagrammes. *C. R. Ac. Sc.*, 204, p. 441.
1937. — La constitution granulométrique des sédiments sableux et les grandes lignes de leur évolution dans les différents milieux géologiques. *C. R. Ac. Sc.*, 204, p. 703.
1937. — Contribution à l'étude géologique des sédiments sableux. *Ann. Inst. Océan.*, 4.
1942. — Données expérimentales sur les conditions physicochimiques de la sédimentation ferrugineuse en milieu marin. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 16, p. 200.
1941. ROEHRICH (C.). — Sur la constitution du bri charentais. *C. R. Ac. Sc.*, 213, p. 623.
1942. ROMANOVSKY et CAILLEUX. — Sols polygonaux et fentes de dessiccation. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XII, p. 321-327.
1943. ROMANOVSKY (V.). — Contribution à l'étude de la rigidité. *Journ. Phys. Rad.*, S. VII, IV, p. 13.
1943. — Influence des ions sur le tassement d'une suspension de poudre de quartz. *C. R. Ac. Sc.*, 215, p. 531.

1943. — Sur un appareil permettant la détermination de la perméabilité des sols. *C. R. Ac. Sc.*, 216, p. 387.
1926. ROSE (M.). — Le plancton et ses relations avec la température, la salinité et la profondeur. *Ann. Inst. Océan.*, III, 4.
1939. ROSSOLINO (L.). — The role of *Chironomus plumosus* larvae in the exchange of substances between the deposits and the water in a lake; *Proc. of the Kossino limnol. stat. of the hydrometeor. Serv. of U. S. S. R.*, 22, pp. 35-52.
1942. ROUCH (J.). — Variation de la température et de la salinité de l'eau de mer à Brest, en fonction de la marée. *Bull. Inst. Océan.*, n° 821.
1941. ROUVILLE (A. DE). — Le régime des côtes. *Ann. des Ponts et Chauss.*
1892. RUSSEL (H. L.). — Bacterial investigation of the sea and its floor. *Bot. Gaz.*, 17, p. 312.
1936. RUSSEL, HOWE, MC GUIRT, DOHM, HADLEY, KNIFFEN et BROWN. — Lower Mississippi River delta. *Louisiana Geol. Surv. Bull.*, 8.
1937. SARAZIN (T.) et MARTIN (R.). — Monographie agricole de la Vendée. *Statist. agric. Fr.*, 1 vol.
1911. SCHLIENZE (W.). — Verbreitung und Verbreitungsbedingungen der höheren Krebse im Mündungsgebiet der Elbe. *Arch. f. Hydrob.*, XIV, p. 429.
1925. SCHMIDT (W.). — Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. *Probl. der Kosmisch. phys.*, Hamburg, Grand, 1 broch., 115 p.
1928. SCHOKALSKY (J.). — L'expédition océanographique de la Mer Noire. *C. R. Ac. Sc.*, t. 186, p. 1707.
1927. SCHOLLENBERGER (C. J.). — A rapid approximate method of determining soil organic matter. *Soil Sc.*, 24, pp. 65-68.
1910. SCHREINER (O.) et SHOREY (E. C.). — Chemical nature of soil organic matter. *U. S. Depart. Agr. Bur. Soil. Bull.*, 74.
1932. SCHULZ (B.). — Einführung in die Hydrographie der Nord-und Ostsee. *Tierwelt der Nord-und Ostsee*, 1-d<sub>2</sub>, pp. 46-88 (fév.).
1903. SCHUCHT (F.). — Beitrag zur Geologie der Wesermarshen. *Zeit. f. Naturwiss.*, p. 1.
1904. — Das Wasser und seine Sedimente in Flutgebiet der Elbe. *Jahrb. Kgl. Preuss. geol. Lan.*, XXV, p. 431.
1935. SEIWELL (G. E.). Note on iron analyses of Atlantic Coastal waters. *Ecology*, XVI, n° 4 (oct.).
1937. SEIWELL (H. R.). — Consumption of oxygen in sea water under control laboratory conditions. *Nature*, 1 vol. 140, p. 506 (sept.).
1892. SHALER (N. S.). — The geologic history of harbours. *Rep. of the U. S. Geol. Surv.*, Washington.
1932. SHEPARD (F. P.). — Sediments on the continental shelves. *Bull. Soc. Geol. Amer.*, 43.
1883. SOLLAS (W. J.). — The estuaries of the Severn and its tributaries; an inquiry into the nature and origin of their tidal sediment and alluvial flats. *Quater. Journ. Geol. Soc. London.*, vol. 39, p. 611.
1938. SOUCI (S. W.). — Die Chemie des Moores. 1 vol., *F. E. Verlag*, Stuttgart.
1942. SOYER (R.). — A propos de la microstratification des cristaux de gypse et la présence de bancs gypseux dans les glaises à Cyrènes à Cormeilles en Parisis. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 13, p. 155.
1937. SPARROW (F. K.). — The occurrence of saprophytic fungi in marine muds. *Biol. Bull.*, LXXIII, n° 2.
1937. STETSON and UPSON. — Bottom deposits of the Ross Sea. *Journ. of sed. petro.*, VII, n° 2.
1940. STEVENS (CH.). — L'origine de la mer flamande et les théories eustatiques. *Bull. Soc. Roy. Belg. Géogr.*, 3 et 4, 19 p.
1910. SUDRY (L.). — L'Etang de Thau. 1 vol., Nancy.
1911. SUDRY (L.). — Densité, température, coloration de l'eau de mer et courants sur la côte du Calvados pendant l'été 1910. *Bull. Inst. Océan.*, n° 199.
1919. SVEN-ODEN. — Die Huminsäure. *Kolloidchem. Beih.*, II, p. 175.
1927. TAYLOR (G. I.). — Turbulence. *Quarter. Journ. Roy. Soc. Meteo.*, LIII, n° 223,

1931. — Internal waves and turbulence in a fluid of variable density. *Rapp. et P. V. Cons. perm. Explor. Mer*, LXXVI, Copenhagen.
1939. TERCIER. — Dépôts marins actuels et séries géologiques. *Eclogæ Geol. Helvetiæ*, XXXII, 1, p. 47.
1936. TERMIER (H.). — Etudes géologiques sur le Maroc central et le Moyen Atlas septentrional. *Notes et Mémoires du Service des Mines du Maroc*, n° 33, Rabat.
1925. TERZAGHI. — Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Brundlage. 1 vol., F. Deuticke, Leipzig.
1932. THOMPSON, BREMNER, JAMIESON. — Occurrence and determination of iron in sea water. *Ind. Engl. Chem. Analytical*, n° 4, p. 288.
1884. THOULET (J.). — Attraction s'exerçant entre les corps en dissolution et les corps solides immergés. *C. R. Ac. Sc.*, 99, p. 1072.
1885. — Attraction s'exerçant entre les corps en dissolution et les corps solides immergés. *C. R. Ac. Sc.*, 100, p. 1002.
1890. — Sur la circulation verticale profonde océanique. *C. R. Ac. Sc.*, 110, p. 1350.
1890. — Océanographie statique 1 vol., Beaudoin, Paris.
1891. — Sur la diffusion de l'eau douce dans l'eau de mer. *C. R. Ac. Sc.*, 112, p. 1068.
1901. — Sur le mode de récolte des échantillons du sol sous-marin. *Bull. Soc. Géogr. comm. Bordeaux* (mai).
1901. — Etude des fonds marins provenant du voisinage des Açores et de la portion orientale de l'Atlantique nord. *Résult. Campagne Scient. du Prince de Monaco*, fasc. XIX.
1901. — Océanographie : détermination de la densité de l'eau de mer. *Résult. Voy. du S. Y. Belgica en 1897, 1898, 1899*, Anvers.
1904. — L'Océan, ses lois, ses problèmes. 1 vol., Hachette, Paris.
1908. — Instruments et opérations d'océanographie pratique. 1 vol., Chapelot, Paris.
1931. TIURIN (I. V.). — A new modification of the volumetric method of determining soil organic matter by means of chromic acid. *Pedology*, 26, pp. 36-47.
1931. TRASK (P. D.). — Sedimentation in the Channel Islands region, California, *Econ. Géol.*, 26, pp. 24-43.
1932. — Origin and Environment of source sediments of Petroleum. *Gulf. Publ. Company*, Houston, Texas.
1932. TWENHOFEL. — A Treatise on sedimentation. 2° édi., Baltimore.
1868. TYLOR (A.). — On the formation of deltas, and on the evidence and cause of great changes in the sea level during the glacial period. *Quat. Journ. Géol. Soc.*, London, 15, pp. 7-11.
1883. UNWIN (W. C.). — The Movement of the water in a tidal River. *E. and F. N. Spou*, London.
1933. URBAIN (P.). — Les sciences géologiques et la notion d'état colloïdal. 1 vol., Actual. Scient., Hermann, Paris.
1937. — Introduction à l'étude pétrographique et géochimique des roches argileuses. 2 vol., Actual. Scient., Hermann, Paris.
1941. — Sur la perméabilité relative de quelques roches argileuses du Bassin de Paris. *C. R. Som. Soc. Géol. Fr.*, 14, p. 106.
1942. — Logique des roches argileuses. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XII, p. 97.
1938. VACHON, GAUDRY et BERNARD. — Contribution à l'étude des phosphates dans l'estuaire du Saint-Laurent. *Stat. Biol. du Saint-Laurent*, n° 12.
1939. VINBERG (G.) et IAROVITZINA (L.). — Daily changes in the quantity of dissolved oxygen as a method for measuring the value of primary production. *Proc. of Kossino limnol. stat. of the hydrometeor Serv. of U. S. S. R.*, 22, pp. 128-143.
1929. VLÈS (F.). — Leçons de chimie physique. 1 vol., Vigot, Paris.
1929. VOLMAT (J.). — XXII<sup>e</sup> Cahier des Recherches hydrographiques. Paris.
1937. VON BRAND (Th.). — Observations upon the nitrogen of the particulate matter in the sea. *Biol. Bull.*, LXXII, n° 1.
1937. VON BRAND (Th.), RAKESTRAW (N. W.), RENN (C. E.). — The experimental decomposition and regeneration of nitrogenous organic matter in sea water. *Biol. Bull.*, LXXII, n° 2.

1926. WAKSMAN (S. A.). — The origin and nature of soil organic matter or soil « humus ». Method of determining humus in the soil. *Soil Sc.*, 22, pp. 221-232.
1929. — Chemical nature of soil organic matter method of analysis and the role of microorganisms in its formation and decomposition. *Trans. Second. Comm. Internat. Soc. Soil. Sc.*, Budapest, Pt. A., pp. 172-197.
1930. WAKSMAN (S. A.) et STEVENS (K. R.). — A critical study of the methods for determining the nature and abundance of soil organic matter. *Soil Sc.*, 30, pp. 97-116.
1931. WAKSMAN (S. A.). — Principles of soil microbiology. 1 vol., *Baillière, Tindall et Cox*, London.
1933. WAKSMAN (S. A.) et CAREY-CORNELIA (L.). — Role of bacteria in decomposition of Plant and animal residues in the Ocean. *Proceed. of. Soc. for Experiment. Biol. and Medec.*, XXX, pp. 526-527.
1933. WAKSMAN (S. A.) et CAREY-CORNELIA (L.). — Role of bacteria in decomposition of of the gulf of Maine. III. Bacteriological investigations of the sea water and marine bottoms. *Biol. Bull.*, vol. LXIV, n° 2, avril.
1933. WAKSMAN (S. A.). — On the distribution of organic matter in the sea bottom and the chemical nature and origin of marine humus. *Soil Sc.*, XXXVI, n° 2 (august).
1933. WAKSMAN, CAREY et REUSZER. — Marine bacteria and their role in the cycle of life in the sea. Decomposition of marine plant and animal residues by bacteria. *Biol. Bull.*, LXV, n° 1 (august).
1934. WAKSMAN, HOTCHKISS et CAREY. — Marine bacteria and their rôle in the cycle of life the sea *Wood's hole ocean. Institut.*, cont. n° 18.
1934. WAKSMAN (S. A.) — The role of bacteria in the cycle of life in the sea. *Scient. Mouth.*, vol. XXXVIII, pp. 35-49.
1935. — The distribution and condition of existence of bacteria in the sea. *Woods hole Ocean. Instit.*, collected reprints 1934, cont. n° 39, 1935.
1934. WAKSMAN (S. A.), CAREY (C. L.) et ALLEN (M. C.). — Bacteria decomposing alginic acid. *Journ. of bact.*, vol. 28, 2 (août).
1936. WAKSMAN (S. A.) et RENN (C. E.). — Decomposition of organic matter in sea water by bacteria. *Biol. Bull.*, LXX, 3,
1937. WAKSMAN (S. A.) et HOTCHKISS (M.). — Viability of bacteria in sea water. *Journ. of bacter.*, vol. 33, n° 4.
1938. WAKSMAN (S. A.), STOKES (J. L.) et BUTLER (M. R.). — Relation of bacteria to diatoms in sea water. *W. H. O. I., collected reprints* 1937, cont. n° 157.
- 1931-1935. — Water pollution research. Survey of the river Tees. *H. M. Station. Off. London.*
1938. — Estuary of the river Mersey. *H. M. S. off. London.*
1937. WATSON (E. E.). — Mixing and residual currents in tidal waters as illustrated in the bay of Fundy. *W. H. O. I., collec. rep.* 1936., cont. n° 88.
1914. WELSCH (J.). — Fixité de la côte Atlantique du Centre-Ouest de la France. *Ann. Géogr.*, t. XXIII, 129.
1919. — L'argile à Scrobiculaires des marais maritimes du Centre-Ouest de la France. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. XIX, pp. 46-61.
1919. — Le marais poitevin. Etude de terrains modernes. *Bull. Cart. Géol. Fr.*, n° 137, t. XXIII.
1924. WERNADSKY (W.). — La géochimie. 1 vol., *F. Alcan*, Paris.
1929. WERNADSKY (W.). — La biosphère. 1 vol., *F. Alcan*, Paris.
1935. — Les problèmes de la radiogéologie. 1 vol., *Actual. Scient., Hermann*, Paris.
1868. WHEELER (W. H.). — Description of the River Witham and the estuary. *Min. proceed. inst. of civil engineers.*, vol. XXVIII.
1893. — Tidal rivers. 1 vol., *Longmans, Green and C°*, London.
1906. — A pratical manual of tides and waves. 1 vol., *Longmans, Green and C°*, London.
1887. WINOGRADSKY (S.). — Ueber Schwefelbacterien. *Botan. Zeit.*, 45, p. 489.
1887. — *Ann. Inst. Pasteur*, 1, p. 548.
1888. — Ueber Eisenbacterien. *Botan. Zeit.*, 46, p. 262.
1891. — *Ann. Inst. Pasteur*, 5, pp. 92 et 577.
1926. — Sur la décomposition de la cellulose dans le sol. *C. R. Ac. Sc.*, t. 183, p. 691,

1927. — Recherches sur la dégradation de la cellulose dans le sol. *C. R. Ac. Sc.*, t. 184, p. 493.
1929. — Etudes sur la microbiologie du sol; IV. Sur la dégradation de la cellulose dans le sol. *Ann. Inst. Past.*, t. XVIII, p. 549.
1932. — Etudes sur la microbiologie du sol. *Ann. Inst. Past.*, t. XLVIII.
1932. — La biologie du sol. *Rev. Botan. Appl.*, n° 126.
1902. WOLLNY. — La décomposition de la matière organique et les formes de l'humus. 1 vol., Paris.
1939. ZBYSZEWSKI (G.). — Essai sur l'hydrologie du Bassin du Sado. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, XII, 3.
1940. ZONE NÉRITIQUE. — Contributions de Abrard, Anché, Berland, Bigot, Burollet, Davy de Virville, Dechaseaux, Fage, Feldmann, Fischer, Fischer-Piette, Fontaine, Germain, Legendre, M<sup>me</sup> Lemoine, Prat, Schenck et Keen, Seurat, Timon-David. *Mém. Soc. Biogéogr.*, H. S. VII, 1 vol., 434 p. *Lechevalier*, Paris.

(Laboratoire de Géographie physique, Faculté des Sciences de Paris, mai 1943.)



